

**SISTEM PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY UNTUK
MENGUKUR KECEPATAN ALIRAN TERBUKA**

SKRIPSI

Oleh :
QATHRUN NADA MUNAWAROH
NIM. 15650049



**JURUSAN TEKNIK INFORMATIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK
IBRAHIM
MALANG
2019**

**SISTEM PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY UNTUK MENGUKUR
KECEPATAN ALIRAN TERBUKA**

SKRIPSI

Diajukan kepada:

**Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang
Untuk Memenuhi Salah Satu Persyaratan dalam
Memperoleh Gelar Sarjana Komputer (S.Kom)**

Oleh :

**QATHRUN NADA MUNAWAROH
NIM. 15650049**

**JURUSAN TEKNIK INFORMATIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2019**

LEMBAR PERSETUJUAN
SISTEM PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY UNTUK MENGUKUR
KECEPATAN ALIRAN TERBUKA

SKRIPSI

Oleh :
QATHRUN NADA MUNAWAROH
NIM. 15650049

Telah Diperiksa dan Disetujui untuk Diuji

Tanggal : 13 Desember 2019

Dosen Pembimbing I



Prof. Dr. Suhartono, M.Kom
NIP. 19680519 200312 1 001

Dosen Pembimbing II



Fatchurrochman, M.Kom
NIP. 19700731 200501 1 002

Mengetahui,
Ketua Jurusan Teknik Informatika
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang



Dr. Cahyo Crysodian
NIP. 19740424 200901 1 008

LEMBAR PENGESAHAN
SISTEM PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY UNTUK MENGUKUR
KECEPATAN ALIRAN TERBUKA

SKRIPSI

Oleh :
QATHRUN NADA MUNAWAROH
NIM. 15650049

Telah Dipertahankan di Depan Dewan Penguji Skripsi dan
Dinyatakan Diterima Sebagai Salah Satu Persyaratan untuk
Memperoleh Gelar Sarjana Komputer (S.Kom)
Tanggal : Desember 2019

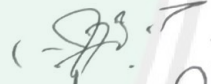
Susunan Dewan Penguji

Tanda Tangan

Penguji Utama : M. Ainul Yaqin, M.Kom
NIP. 19761013 200604 1 004

()

Ketua Penguji : Khadijah F.H. Holle, M.Kom
NIDT. 19900626 20160801 2 077

()

Sekretaris Penguji : Prof. Dr. Suhartono, M.Kom
NIP. 19680519 200312 1 001

()

Anggota Penguji : Fatchurrochman, M.Kom
NIP. 19700731 200501 1 002

()

Mengetahui dan Mengesahkan,
Ketua Jurusan Teknik Informatika
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang



Dr. Cahyo Crysdian
NIP. 19730424 200901 1 008

PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini :

Nama : Qathrun Nada Munawaroh

Nim : 15650049

Fakultas / Jurusan : Sains dan Teknologi / Teknik Informatika

Judul Skripsi : **SISTEM PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY UNTUK MENGUKUR KECEPATAN ALIRAN TERBUKA.**

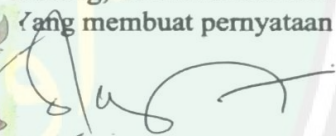
Menyatakan dengan sebenarnya bahwa Skripsi yang saya tulis ini benar – benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilalihan data, tulisan atau pikiran orang lain yang saya akui sebagai hasil tulisan atau pikiran saya sendiri, kecuali dengan mencantumkan sumber cuplikan pada daftar pustaka.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan Skripsi ini hasil jiplakan, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Malang, 28 November 2019

Yang membuat pernyataan




Qathrun Nada Munawaroh
NIM. 15650049

MOTTO

العلم يهتف بالعمل، فإن أجاب وإلا ارتحل

*Ilmu memanggil untuk diamalkan. Jika panggilan itu disambut, ilmu akan tetap.
Namun jika panggilan itu tidak disambut, ilmu akan pergi.*

-Ulama Sufi

*Penyedap rasa usaha adalah do'a, ramuan pelengkap do'a adalah usaha. Do'a
tanpa usaha, usaha tanpa do'a adalah rasa hambar yang ditemuinya.*

-Qathrun NM



HALAMAN PERSEMBAHAN

Alhamdulillah puji syukur ke Hadirat Allah SWT yang telah memberikan nikmat *dhohiriyah* dan *bathinyah* sehingga penulis mampu untuk menyelesaikan studi S1 di kampus UIN Malang ini. Salawat serta salam selalu tercurahkan kepada Baginda Nabi Muhammad SAW, yang telah membimbing umatnya menuju jalan yang benar.

Terima kasih kepada kedua orang tua yang tak pernah putus doanya, Ayah tercinta, Ayah H. Fadlil yang selalu mendidik, mengarahkan serta memberikan contoh hal-hal kehidupan terutama keagamaan. Ibu Hj. Nur Kunaimah sebagai madrasah pertamaku yang tidak pernah mengeluh lelah mendidik dan menyayangi anak-anaknya. Tak lupa kakak saya Ida Fitri Shobiha dan adik-adik saya, Zanuba Wulandari, Anzali Sururi, Moh. Nael Barka, semoga seluruh tujuan tercapai dan diberikan yang terbaik.

Teruntuk seluruh guru, ustad, kiai dan dosen dari MI, Pondok Pesantren hingga Perguruan Tinggi. Pembimbing skripsiku Prof. Dr. Suhartono, M. Kom. dan H. Fatchurrochman, M.Kom yang dengan tulus, sabar, dan ikhlas membimbing serta menyalurkan pengetahuannya. Nasehat-nasehat bapak akan selalu diingat dan kita akan terus terhubung melalui sambung doa sampai akhir hayatku.

Teman seperjuangan *Interface* TI'15 UIN Maliki Malang, kakak dan adik tingkat, Ponpes Sabilurrasyad Gasek, PMII rayon Pencerahan Galileo serta KOS Niadili dan Hilda yang telah meluangkan waktunya. Rekan-rekan dan semua pihak yang tak bisa disebutkan satu persatu, terima kasih. Semoga terus terhubung meskipun dalam untaian doa yang mengiringi kesuksesan kita.

KATA PENGANTAR

Assalamualaikum Warahmatullahi Wabarokatuhu.

Alhamdulillah Robbil ‘Alamiin, segala puji bagi Allah yang selalu memberikan nikmat *dhohiriyah* dan nikmat *bathiniyah* dalam proses penyelesaian skripsi ini. Sholawat serta salam selalu tercurahkan kepada junjungan, baginda dan pusaka umat islam, Nabi Muhammad SAW yang telah memberikan teladan, bimbingan dan petunjuk, sehingga umat manusia menjadi lebih beradab.

Dalam menyelesaikan skripsi ini, banyak pihak yang telah memberikan bantuan baik secara moril, nasihat dan semangat maupun materiil. Atas segala bantuan yang telah diberikan, penulis ingin menyampaikan doa dan ucapan terimakasih yang sedalam-dalamnya kepada:

1. Prof. Dr. Suhartono, M. Kom., selaku dosen pembimbing I yang telah meluangkan waktu untuk membimbing, mengarahkan dan memberi masukan kepada penulis dalam pengerjaan skripsi ini hingga akhir.
2. H. Fatchurrochman, M.Kom, selaku dosen pembimbing II yang telah membimbing serta memberikan masukan kepada penulis dalam pengerjaan skripsi ini.
3. Bapak Dr. Cahyo Crysdian, selaku Ketua Jurusan Teknik Informatika yang telah memberikan motivasi untuk terus berjuang.
4. Segenap dosen teknik informatika yang telah memberikan bimbingan keilmuan kepada penulis selama masa studi.
5. Teman-teman seperjuangan teknik informatika Interface 2015.

Berbagai kekurangan dan kesalahan mungkin pembaca temukan dalam penulisan skripsi ini, untuk itu penulis menerima segala kritik dan saran yang membangun dari pembaca sekalian. Semoga apa yang menjadi kekurangan bisa disempurnakan oleh peneliti selanjutnya dan semoga karya ini senantiasa dapat memberi manfaat.

Wassalamualaikum Warahmatullahi.Wabarokatuhu.

Malang, 20 Desember 2019

Penulis



DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
LEMBAR PERSETUJUAN.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN	iii
PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN.....	iv
MOTTO.....	v
HALAMAN PERSEMBAHAN.....	vi
KATA PENGANTAR	vii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xii
DAFTAR TABEL.....	xiv
ABSTRAK	xv
ABSTRACT.....	xvi
ملخص.....	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	5
1.3 Tujuan Penelitian	6
1.4 Manfaat Penelitian.....	6
1.5 Batasan Masalah	7
BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....	8
2.1 Aliran Air di Saluran Terbuka	8
2.1.1 Dasar Saluran Terbuka	12
2.1.2 Pemodelan Saluran Terbuka.....	13
2.1.3 Distribusi Kecepatan pada Penampang Saluran	16
2.2. Metode Particle Image Velocimetry (PIV).....	17
2.2.1 Large-Scale Particle Image Velocimetry (PIV).....	18
2.2.2 Image Pre-processing	20
2.2.3 Pengolahan Citra Digital	22
2.2.4 Segmentasi.....	23
2.2.5 Pengenaan Pola.....	24
2.2.6 Image Evaluation.....	25

2.3 Metode Korelasi Silang	26
2.4 Metode Discrete Fourier Transformation	27
2.5 Penelitian Terkait.....	28
2.5.1 Penelitian Terkait Aliran Air di Saluran Terbuka	28
2.5.2 Penelitian Terkait Pemodelan pada Saluran Terbuka.....	29
2.5.3 Penelitian Terkait Distribusi Pengukuran Kecepatan Aliran..	29
2.5.4 Penelitian Terkait Metode Particle Image Velocimetry	30
2.5.5 Penelitian Terkait Metode Korelasi Silang.....	30
2.5.6 Penelitian Terkait Discrete Fourier Transformaton.....	31
BAB III METODOLOGI PENELITIAN.....	32
3.1 Tahapan Penelitian.....	32
3.2 Studi Literatur	32
3.3 Pengumpulan Data.....	33
3.3.1 Deskripsi Data	33
3.3.2 Sampling Rate.....	34
3.4 Perancangan Sistem.....	35
3.4.1 Image Pre-processing	38
3.4.2 Akuisisi Citra.....	40
3.4.3 Ekstraksi Ciri Citra	42
3.4.4 Nilai Pixel Lokasi Titik	44
3.4.5 Image Evaluation.....	45
3.4.6 Image Post-processing.....	52
3.4.7 Data Exploration.....	54
3.5 Desain User Interface	56
3.6 Metode Pengujian Sistem.....	57
BAB IV UJI COBA DAN PEMBAHASAN	58
4.1 Langkah Uji Coba	58
4.1.1 <i>Preprocessing</i> Data.....	58
4.1.2 Analisis Pengaturan Sistem PIV	60
4.1.3 Analisis Visualisasi Pengaturan Sistem PIV	64
4.2 Hasil Uji Coba.....	75
4.2.1 Lingkup Uji Coba	75

4.2.2 Hasil Percobaan pada Aliran Lurus	75
4.2.3 Hasil Percobaan pada aliran Vortex	80
4.2.4 Hasil Percobaan pada Aliran dengan Pengaruh Pilar	85
4.3 Pembahasan	90
BAB V PENUTUP	97
5.1 Kesimpulan	97
5.2 Saran	98
DAFTAR PUSTAKA	99



DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 a) Aliran Seragam b) Aliran Tidak Seragam.....	10
Gambar 2.2 Metode Pengukuran Menggunakan LSPIV.....	19
Gambar 2.3 Sistem Pengolahan Citra	22
Gambar 2.4 Teknik Segmentasi Citra	23
Gambar 2.5 Matrik Korelasi pada MATLAB	25
Gambar 3.1 Tahapan Penelitian	32
Gambar 3.2 Rancangan Sistem	37
Gambar 3.3 Flowchart Image Pre-processing.....	38
Gambar 3.4 Flowchart Citra	41
Gambar 3.5 Flowchart Korelasi Silang	45
Gambar 3.6 Contoh citra dalam $B(x,y)$	49
Gambar 3.7 Fungsi Gaussian untuk Proses Peak Finding.....	52
Gambar 3.8 Flowchart Image Post-processing	53
Gambar 3.9 Histogram Hasil Pengukuran Kecepatan.....	55
Gambar 3.10 Tampilan Sistem PIV	56
Gambar 4.1 Data Gambar Input PIV.....	59
Gambar 4.2 Bentuk Aliran Untuk Data Input	59
Gambar 4.3 Perbaikan gambar dengan CLAHE	60
Gambar 4.4 Pembagian Lintasan Area Analisis	61
Gambar 4.5 Analisa PIV.....	74
Gambar 4. Analisis PIV dalam Saluran Lurus	75
Gambar 4.7 <i>Calibration</i> pada saluran Lurus.....	76
Gambar 4.8 Perhitungan <i>Calibration</i>	76
Gambar 4.9 Hasil Penghalusan dan Penskalaan Data Aliran Lurus	77
Gambar 4.10 Histogram Aliran Lurus	78
Gambar 4.11 Analisis PIV dalam Aliran Vortex	81
Gambar 4.12 Hasil <i>Calibration</i> terhadap Jarak Nyata.....	81
Gambar 4.13 Hasil Penghalusan dan Penskalaan Data Aliran Vortex.....	82
Gambar 4.14 Histogram Kecepatan Aliran Vortex.....	83
Gambar 4.15 Analisis PIV Aliran dengan Pengaruh Pilar	86
Gambar 4.16 <i>Calibration</i> Aliran dengan Pengaruh Pilar.....	87

Gambar 4.17 Perhitungan <i>Calibration</i> Aliran dengan Pengaruh Pilar	87
Gambar 4.18 Hasil Penghalusan dan Penskalaan Data aliran dengan Pilar.....	88
Gambar 4.19 Histogram Kecepatan Aliran dengan Pengaruh Pilar.....	88
Gambar 4.20 Hasil Skala Data dalam 3 Bentuk Aliran	94
Gambar 4.21 Hasil Histogram Kecepatan dalam 3 Bentuk Aliran	94



DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Harga Koefisien Manning.....	13
Tabel 2.2 Sifat-sifat Fourier Transformation	27
Tabel 3.1 Format File yang Digunakan.....	35
Tabel 3.2 Hasil Perhitungan Metode Korelasi Silang.....	55
Tabel 4.1 Perhitungan Kecepatan	64
Tabel 4.2 Hasil Perhitungan Kecepatan Manual pada Aliran Lurus.....	79
Tabel 4.3 Hasil Perhitungan Kecepatan Aliran Lurus pada Sistem	80
Tabel 4.4 Hasil Perhitungan Kecepatan Manual pada Aliran Vortex.....	84
Tabel 4.5 Hasil Perhitungan Kecepatan Aliran Vortex pada Sistem	85
Tabel 4.6 Hasil Perhitungan Kecepatan Manual pada Aliran dengan Pilar	89
Tabel 4.7 Hasil Perhitungan Kecepatan Aliran dengan Pilar pada Sistem	90

ABSTRAK

Munawaroh, Qathrun Nada. 2019. **Sistem Particle Image Velocimetry Untuk Mengukur Kecepatan Aliran Terbuka** . Skripsi. Jurusan Teknik Informatika Fakultas Sains dan Teknologi Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Pembimbing (I) Prof. Dr. Suhartono, M. Kom, (II) Fatchurrochman, M.Kom.

Kata Kunci : *Particle Image Velocimetry (PIV)*, Kecepatan, Aliran Terbuka.

Aliran saluran terbuka adalah saluran yang mengalirkan air dengan permukaan bebas. Saluran terbuka dapat terjadi dalam bentuk yang bervariasi cukup besar, mulai dari aliran di atas permukaan tanah yang terjadi pada waktu hujan sampai aliran dengan kedalaman prismatis. Perubahan kecepatan aliran merupakan salah satu faktor yang menentukan keadaan, sifat aliran dan pengaruh terhadap tingginya permukaan aliran. Perkembangan teknologi membantu pengukuran kecepatan aliran dengan tidak mengganggu aliran yang sedang terjadi, agar data yang dihasilkan lebih akurat. Maka pada penelitian ini menggunakan rekaman gambar aliran untuk dianalisis sesuai dengan metode *Particle Image Velocimetry (PIV)*. Percobaan pada penelitian ini dilakukan pada 3 bentuk aliran, yaitu aliran pada saluran lurus, aliran vortex dan aliran dengan pengaruh pilar. Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui pengukuran kecepatan aliran terbuka menggunakan metode *PIV (Particle Image Velocimetry)* dengan proses analisa dari data gambar. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pengukuran kecepatan aliran dengan metode *Particle Image Velocimetry* memiliki hasil nilai RMSE yang mendekati 0%. Pada percobaan analisis aliran pada saluran lurus menghasilkan nilai RMSE 0.13372%, aliran vortex 0.13266% dan pada aliran dengan pengaruh pilar yaitu 0.16894%.

ABSTRACT

Munawaroh, Qathrun Nada. 2019. **A Particle Image Velocimetry System to Measure Open Flow Velocity** . Undergraduate Thesis. Informatics Engineering Department of Science and Technology Faculty Islamic State University Maulana Malik Ibrahim Malang. Supervisor: (I) Prof. Dr. Suhartono, M. Kom, (II) Fatchurrochman, M.Kom.

Keyword : Particle Image Velocimetry (PIV), Velocity, Open Flow.

Open Flow is a conduit that delivers water with a free surface. Open Flow can occur in varies forms which quite large, ranging from water flow over the land surface that occurs during rain to flow with a prismatic depth. The change in flow velocity is one of the factors that determine the state, nature of the flow and the effect on the surface height of the flow. Technological developments help measure flow velocity by not interrupting the flow which is happening, so that the resulting of data is more accurate. Therefore, this study used a flow image recording to be analyzed based on the Particle Image Velocimetry (PIV) method. The experiments on this study were carried out in 3 forms of flow, namely flow on a straight stream, vortex flow and flow with the effect of pillar. The purpose of this study was to determine the measurement of open flow velocity using the PIV (Particle Image Velocimetry) method with the analysis process of image data. The results of this study showed that the measurement of flow velocity by the Particle Image Velocimetry method had an RMSE value approaching 0%. In the flow analysis experiment on the straight stream, the RMSE value is 0.13372%, the vortex flow is 0.13266% and the flow with the effect of pillar is 0.16894%.

ملخص

منورة ، قطر الندى. 2019. نظام قياس سرعة صورة الجسيمات لقياس سرعة التدفق المفتوحة. البحث. قسم المعلوماتية كلية العلوم والتكنولوجيا جامعة مولانا مالك إبراهيم الإسلامية الحكومية بمالانج. المشرف (1) الأستاذ دكتور سوهارتونو الماجستر. (2) فاتكور رهمان الماجستر.

كلمات الرئيسية: سرعة صورة الجسيمات، سرعة، التدفق المفتوحة

تدفق قناة مفتوحة هو القناة التي تستنزف المياه مع سطح حر. يمكن أن تحدث القنوات المفتوحة بأشكال مختلفة كبيرة بما فيه الكفاية، بدءاً من التدفق فوق مستوى الأرض الذي يحدث عندما تملأ إلى عمق المنشورية. التغييرات في سرعة التدفق هي واحدة من العوامل التي تحدد الموقف، طبيعة التدفق وتأثيره على ارتفاع سطح التدفق. تساعد التطورات التكنولوجية في قياس سرعة التدفق من خلال عدم مقاطعة التدفق الذي يحدث، بحيث تكون البيانات التي تم إنشاؤها أكثر دقة. لذلك في هذه الدراسة باستخدام تسجيل صورة التدفق ليتم تحليلها وفقاً للطريقة سرعة صورة الجسيمات. أجريت التجارب في هذه الدراسة على ثلاثة أشكال من التدفق، هو التدفق في قناة مستقيمة ، وتدفق دوامة وتدفق تأثير عمود. كان الغرض من هذه الدراسة هو تحديد قياس سرعة التدفق المفتوح باستخدام الطريقة سرعة صورة الجسيمات مع عملية تحليل بيانات الصورة. وأظهرت النتائج أن قياس سرعة التدفق مع سرعة صورة الجسيمات له نتيجة قيمة خطأ الجذر التربيعي (RMSE) تقترب 0%. في التحليل التجريبي للتدفق على قناة مباشرة تنتج قيمة (RMSE) 0.13372 %، تدفق دوامة 0.13266 %، وعلى التدفق مع تأثير العمود هو 0.16894 %.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Aliran saluran terbuka adalah saluran yang mengalirkan air dengan permukaan bebas. Saluran terbuka dapat terjadi dalam bentuk yang bervariasi cukup besar, mulai dari aliran di atas permukaan tanah yang terjadi pada waktu hujan sampai aliran dengan kedalaman air konstan dalam saluran prismatis. Mekanika aliran saluran terbuka lebih sulit dibanding dengan mekanika saluran tertutup. Aliran saluran terbuka memiliki permukaan bebas yang dipengaruhi oleh tekanan udara, sedangkan pada aliran tertutup alirannya terkurung dalam ruang sehingga tidak dapat terpengaruhi langsung oleh tekanan udara kecuali tekanan hidrolis. Salah satu contoh saluran terbuka yang dijumpai adalah sungai. Sungai merupakan tipe umum dari saluran terbuka namun memiliki bentuk penampang melintang yang tidak teratur. Sungai berperan sebagai saluran utama (primer) yang menampung air dari saluran sekunder dan tersier. Seluruh jaringan yang termasuk dalam sistem saluran terbuka didesain untuk mengalir secara gravitasi yaitu mengalir dari hulu ke hilir (Chow, 1992).

Saluran terbuka memiliki berbagai macam karakteristik yang diklasifikasikan, hal ini untuk mempermudah mengetahui bentuk aliran yang terjadi. Karakteristik aliran dapat diketahui dengan melakukan pengukuran kecepatan aliran. Kondisi aliran dalam saluran terbuka yang rumit berdasarkan kenyataan bahwa kedudukan permukaan yang bebas cenderung berubah sesuai waktu, ruang, kedalaman aliran, debit, kemiringan dasar saluran yang tergantung satu sama lain. Kondisi fisik saluran terbuka lebih bervariasi dibandingkan dengan

pipa. Perubahan setiap parameter saluran yang saling berkombinasi akan mempengaruhi kecepatan yang terjadi. Perubahan kecepatan tersebut menentukan keadaan, sifat aliran dan pengaruh terhadap ketinggian permukaan (Triatmodjo, 1996).

Perubahan kecepatan yang menentukan keadaan, sifat aliran dan pengaruh terhadap ketinggian permukaan dapat digunakan oleh BNPB (Badan Nasional Penanggulangan Bencana) untuk mengetahui bencana alam yang dapat terjadi, seperti banjir. Ketika kondisi kecepatan aliran rendah maka peluang terjadinya bencana banjir rendah. Sedangkan ketika kondisi kecepatan aliran tinggi maka peluang terjadinya bencana banjir juga tinggi (Soekarno, 2009). Maka dari pernyataan tersebut dapat diketahui bahwa informasi tentang kecepatan aliran dibutuhkan untuk menentukan kebijakan penanggulangan bencana yang mungkin terjadi. Dalam Al-Qur'an surat Ar Ra'd ayat 17 Allah berfirman :

أَنْزَلَ مِنَ السَّمَاءِ مَاءً فَسَالَتْ أَوْدِيَةٌ بِقَدَرِهَا فَاحْتَمَلَ السَّيْلُ زَبَدًا رَابِيًا ۚ (١٧)

17. Allah telah menurunkan air (hujan) dari langit, maka mengalirlah air di lembah-lembah menurut ukurannya, maka arus itu membawa buih yang mengambang.

Dijelaskan dalam tafsir Ibnu Katsir bahwa masing-masing lembah dipenuhi oleh air hujan sesuai dengan ukuran luasnya, lembah yang luas memuat banyak air dan lembah yang kecil memuat air sesuai dengan ukurannya. Dimana pada air yang mengalir di permukaan lembah tersebut terdapat buih-buih yang mengikuti arus alirannya.

Saat ini, ilmu pengetahuan manusia telah dikembangkan melalui berbagai alat yang digunakan untuk mengukur besarnya kecepatan aliran. Pengukuran

kecepatan aliran dapat dilakukan pada suatu titik di dalam aliran, seperti menggunakan turbin meter, alat tabung pitot dan *currentmeter*. Data kecepatan yang diperoleh dengan menggunakan peralatan tersebut terbatas pada data kecepatan aliran di suatu titik. Penelitian yang telah dilakukan terkait dengan sistem pengukuran kecepatan aliran yaitu penelitian yang dilakukan oleh Indra Setia Putra (2015). Pada penelitian tersebut dilakukan pengukuran menggunakan *currentmeter* dan menggunakan pemilihan kondisi lokasi. Kemudian hasil dari pengukuran *currentmeter* dilakukan analisis kecepatan.

Tujuan penelitian yang dilakukan oleh Indra Setia Putra (2015) yaitu untuk mengetahui pengelolaan sungai yang meliputi konservasi sungai, pengembangan sungai dan pengendalian daya rusak sungai dengan melakukan pengukuran kecepatan secara langsung untuk mengetahui debit sungai. Hasil yang diperoleh yaitu diharuskan memilih lokasi dengan melihat kondisi titik lokasi pengukuran aliran yang akan diukur dan tidak adanya gangguan terhadap aliran air. Lama waktu yang dibutuhkan yaitu minimal 26 jam atau lebih dari satu hari dengan alat bantu penopang agar tidak membuat posisi alat tergeser. Penelitian ini merekomendasikan untuk melakukan beberapa pembaharuan terhadap alat pengukuran agar dapat dilakukan secara praktis dalam peralatan, biaya dan waktu yang tidak lama.

Berdasarkan permasalahan diatas, dibutuhkan sebuah metode yang efektif dalam pengukuran. Metode yang berkembang mengikuti instrumen alat ukur aliran fluida semakin banyak, diantaranya *Laser Doppler Velocimetry (LDV)*, *Acoustic Doppler Velocimetry (ADV)* dan *Particle Image Velocimetry (PIV)*. Metode-metode instrumen alat ukur tersebut mempunyai pendekatan yang berbeda-beda untuk menghitung kecepatan aliran fluida. Metode *LDV* dan *ADV* dapat digunakan untuk

mengukur pada satu titik saja saat tertentu. Sedangkan metode *PIV* mampu memetakan vektor kecepatan sesaat aliran pada semua titik yang ditangkap oleh kamera (Markus, 2007). Metode *PIV* telah berkembang pesat dalam beberapa tahun pada studi kasus investigasi medan aliran yang kompleks. Pengembangan *PIV* dilakukan dengan penyempurnaan proses penyediaan lembar cahaya dengan meningkatkan intensitas sumber cahaya, kualitas partikel *seeder* (ukuran optimal), software pada proses segmentasi citra dan autokolerasi image untuk menentukan kolerasi satu partikel dengan partikel lainnya.

Metode *PIV* menggunakan teknik foto untuk mengambil sampel dimana tidak mengganggu aliran yang akan diteliti. Maka *PIV* mampu memberikan data profil kecepatan sesaat dan trubulensi fluida untuk banyak titik dalam waktu yang sama. Pada prinsipnya metode *PIV* mengandalkan rekaman gambar partikel yang bergerak bersama obyek ukur (*seeder*) pada beberapa lokasi yang dapat terukur dengan baik. Olahan gambar selanjutnya dibaca untuk mendapatkan besar dan arah kecepatan pada lokasi *seeder* yang ditangkap kamera. Pengambilan gambar sangat terkait dengan pencahayaan yang membutuhkan metode-metode untuk pengendalian pencahayaan dengan perekaman secara terus menerus. Metode yang biasa digunakan yaitu menggunakan lampu strobo dan cahaya menerus dengan perekaman berurutan. Pengendalian pencahayaan ini dapat dipilih sesuai dengan penyediaan biaya (Rahardjo, 2011).

Pengukuran pola aliran permukaan pada model fisik dan Sei Tembesi juga pernah dilakukan oleh Prabowo, (2008). Dalam penelitian tersebut menggunakan bola warna sebagai partikel yang mengikuti aliran permukaan pada model fisik hidraulik. Penelitian tersebut menggunakan kamera webcame untuk merekam

pergerakan bola yang mengapung pada aliran. Logika pengolahan citra menggunakan logika pengurangan dan morfologi untuk segmentasi citra. Sedangkan untuk logika korelasi antar partikel menggunakan data warna bola untuk menghubungkan partikel bola pada citra pertama dan bola pada citra ke dua. Penelitian pengukuran kecepatan aliran terbuka dilakukan oleh beberapa peneliti terdahulu yang umumnya menggunakan peralatan yang canggih dan mahal.

Dengan berpedoman pada penelitian sebelumnya maka perlu dilakukan analisis pengukuran kecepatan aliran terbuka menggunakan metode *particle image velocimetry (PIV)*, karena adanya metode ini BNPB dapat memperoleh informasi dengan nilai keakurasian tinggi dan waktu yang lebih cepat dibandingkan menggunakan metode yang lainnya. Pada penelitian ini dilakukan analisis pengukuran kecepatan aliran terbuka menggunakan metode *PIV* dengan alat ukur yang lebih ekonomis dan program yang mampu menganalisis data sesuai konteks kebutuhan penelitian. Penelitian ini berfokus pada model fisik yang digunakan sebagai lahan penelitian dengan pencahayaan menggunakan lampu laser pointer yang praktis dan partikel metalik yang murah dan mudah didapatkan. Selain itu juga ditambahkan perhitungan nilai RMSE (*Root Mean Square Error*) yang berguna untuk menguji keakurasian data kecepatan dari hasil proses pengolahan gambar.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang pada sebelumnya, maka terdapat permasalahan yang diangkat dalam penelitian sebagai berikut :

1. Bagaimana menggunakan *PIV (Particle Image Velocimetry)* pada pengukuran kecepatan aliran terbuka?

2. Bagaimana pola kecepatan aliran terbuka yang diperoleh dengan menggunakan metode *PIV (Particle Image Velocimetry)*?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun maksud dan tujuan yang didapat dari penelitian ini adalah sebagai berikut :

1. Untuk menggunakan *PIV (Particle Image Velocimetry)* sebagai pengukur kecepatan aliran terbuka.
2. Untuk mengetahui pola kecepatan aliran terbuka yang diperoleh dengan metode *PIV (Particle Image Velocimetry)*.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang didapat dari penelitian ini dapat dipandang dari dua aspek yaitu secara teoritis dan praktik. Adapun manfaat tersebut sebagai berikut :

1. Secara teoritis, pemahaman dan pembelajaran dalam penggunaan metode *PIV (Particle Image Velocimetry)* sebagai pengukur kecepatan aliran terbuka.
2. Secara khusus, memudahkan pengukuran kecepatan aliran terbuka menyangkut informasi arus aliran yang digunakan oleh BNPB (Badan Nasional Penanggulangan Bencana) untuk mengetahui bencana alam yang dapat terjadi seperti banjir.
3. Secara umum, memudahkan pengukuran kecepatan angin, asap, lahar yang dapat digunakan oleh BNPB terkait informasi kondisi dari masing-masing terhadap dampak yang akan terjadi.

1.5 Batasan Masalah

Agar pembahasan penelitian ini tidak menyimpang dari perumusan, maka diperlukan batasan dalam penelitian sebagai berikut :

1. Penelitian ini menggunakan data set dari laboratorium PIV (*Particle Image Velocimetry*) yang diakses melalui <https://pivlab.blogspot.com>.
2. Data yang digunakan yaitu dengan menggunakan 3 karakteristik aliran.
3. Software yang digunakan yaitu MATLAB r2014.



BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Aliran Air di Saluran Terbuka

Saluran terbuka merupakan saluran air yang mengalir dengan muka air yang bebas. Pada semua titik di sepanjang saluran, tekanan air di permukaan air adalah sama (tekanan atmosfer). Pada saluran terbuka variabel aliran sangat tidak teratur baik terhadap ruang ataupun terhadap waktu. Variabel tersebut berupa tampang lintang saluran, kekasaran saluran, belokan, debit aliran, kecepatan aliran dan sebagainya.

Menurut Cow (1992:17), saluran yang mengalirkan air dengan suatu permukaan bebas disebut saluran terbuka. Menurut asalnya saluran dapat digolongkan menjadi saluran alam (natural) dan saluran buatan (artificial). Saluran alam meliputi semua alur air yang terdapat secara alamiah di bumi, mulai dari anak selokan kecil di pegunungan, selokan kecil, sungai kecil dan sungai besar sampai kemuara sungai.

Saluran terbuka menurut Triatmodjo (1996:103) adalah saluran dimana air mengalir dengan muka air bebas. Pada saluran terbuka, misalnya sungai (saluran alam), variabel aliran sangat tidak teratur terhadap ruang dan waktu. Variabel adalah tampang lintang saluran, kekasaran, kemiringan dasar, belokan, debit aliran, kecepatan aliran dan sebagainya.

Dalam saluran terbuka terdapat berbagai macam karakteristik yang diklasifikasikan untuk mempermudah mengetahui bentuk aliran yang terjadi. Beberapa klasifikasi diantaranya yaitu :

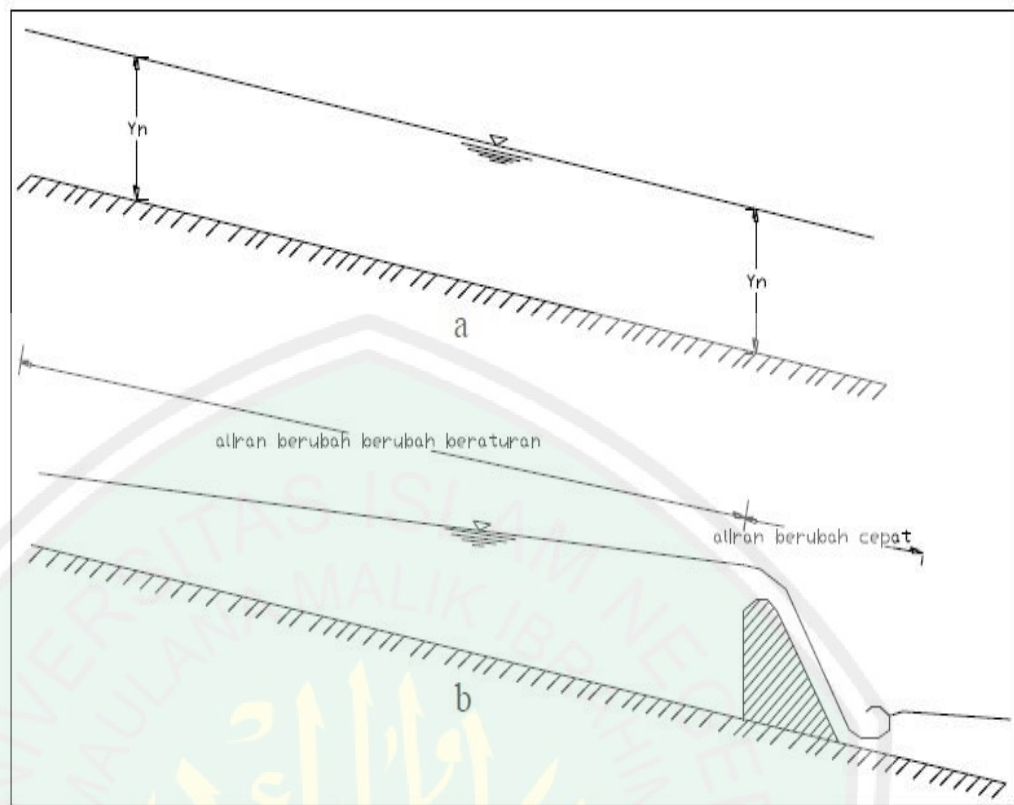
1. Aliran permanen atau tidak permanen

Jika variabel dari aliran pada suatu titik tidak berubah terhadap waktu, maka aliran disebut aliran permanen atau tunak (*steady flow*), jika variabel tersebut pada suatu lokasi tertentu berubah terhadap waktu maka alirannya disebut aliran tidak permanen atau tidak tunak (*unsteady flow*).

2. Aliran seragam dan berubah

Aliran melalui saluran terbuka adalah seragam (*uniform*) jika berbagai variabel aliran seperti kedalaman, tampang basah, kecepatan aliran dan debit pada setiap tampang di sepanjang saluran dalam keadaan konstan. Pada aliran seragam garis energi, garis muka air dan dasar saluran dalam keadaan sejajar sehingga kemiringan dari ketiga garis tersebut sama. Kedalaman air pada aliran seragam disebut kedalaman normal (Y_n). Untuk debit aliran dan luas tampang lintang saluran tertentu kedalaman normal dalam keadaan konstan di seluruh panjang saluran.

Aliran disebut tidak seragam atau berubah (*non uniform flow* atau *varied flow*) jika variabel saluran kedalaman, tampang basah, kecepatan di sepanjang saluran tidak konstan. Apabila perubahan aliran terjadi pada jarak yang pendek maka disebut aliran berubah cepat, sedang apabila terjadi pada jarak yang panjang disebut aliran berubah beraturan. Di dalam aliran tidak seragam garis tenaga tidak sejajar dengan garis muka air dan dasar saluran. Kedalaman dan kecepatan aliran di sepanjang saluran tidak konstan, pengaliran ini terjadi apabila tampang lintang sepanjang saluran tidak konstan, seperti sungai.



Gambar 2.1 a) Aliran seragam b) Aliran tidak seragam (Sumber: Triatmodjo, 1996)

3. Aliran laminar dan trubulen

Jika partikel zat bergerak mengikuti alur tertentu dan aliran tampak seperti gerakan serat-serat atau lapisan-lapisan tipis yang paralel, maka disebut aliran laminar. Sebaliknya, jika partikel zat cair bergerak mengikuti alur yang tidak beraturan, baik ditinjau terhadap ruang ataupun waktu, maka alirannya disebut aliran trubulen. Faktor yang menentukan keadaan aliran adalah pengaruh relative antara kekentalan (*viskositas*) dan gaya *inersia*. Jika gaya *viskotas* yang dominan, maka alirannya trubulen. Hubungan antara gaya kekentalan dan *inersia* dinyatakan dalam bidang *reynold(rey)* yang didefinisikan seperti rumus berikut :

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad (2.1)$$

Keterangan :

- Re : Bilangan Reynolds
 V : Kecepatan aliran (m/detik)
 D : Panjang karakteristik (m)
 ν : Viskositas (m^2/detik)

Berdasarkan pada percobaan aliran di dalam pipa, Reynolds menetapkan bahwa untuk bilangan *Reynolds* di bawah 500, aliran pada kondisi tersebut adalah laminar.

4. Aliran subkritis, kritis dan super kritis

Menurut Chow (1995) dalam Mulyandari (2010), bahwa akibat dari gaya tarik bumi terhadap aliran dinyatakan dengan rasio gaya *inersia* dengan gaya tarik bumi. Rasio ini ditetapkan sebagai bilangan Froude (*Fr*) yang didefinisikan dengan rumus :

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{g \times h}} \quad (2.2)$$

Keterangan :

- Fr : Angka Froude
 v : Kecepatan aliran (m/s)
 g : Percepatan gravitasi (m^2/s)
 h : Kedalaman aliran (m)

Aliran dikatakan kritis ($Fr=1$) apabila kecepatan aliran sama dengan kecepatan gelombang gravitasi dengan amplitudo kecil. Gelombang gravitasi dapat dibangkitkan dengan merubah kedalaman. Jika kecepatan aliran lebih kecil daripada kecepatan kritis, maka alirannya disebut subkritis ($F<1$), sedangkan jika kecepatan alirannya lebih besar daripada kecepatan kritis, maka alirannya disebut superkritis ($Fr>1$). Parameter yang menentukan ketiga jenis aliran tersebut adalah

nisbah antara gaya gravitasi dan gaya *inersia* yang dinyatakan dengan bilangan Froude.

2.1.1 Dasar Saluran Terbuka

Zat cair yang mengalir melalui saluran terbuka akan meninggalkan tegangan gaya (tahanan) pada dinding saluran. Tahanan ini akan diimbangi oleh komponen gaya berat yang bekerja pada zat cair dalam arah aliran. Di dalam aliran seragam, komponen gaya berat dalam arah aliran adalah seimbang dengan tahanan geser. Tahanan geser ini tergantung pada kecepatan aliran. Berdasarkan keseimbangan gaya-gaya yang terjadi tersebut dapat diturunkan rumus manning untuk menghitung kecepatan yang terjadi sebagai berikut :

$$V = \frac{1}{n} \times R^{\frac{2}{3}} \times I^{\frac{1}{2}} \quad (2.3)$$

$$R = \frac{A}{P} \quad (2.4)$$

Keterangan :

- V : Kecepatan aliran (m/s)
- n : Nilai koefisien manning
- R : Radius hidraulik (m)
- A : Luas penampang saluran (m²)
- P : Keliling penampang saluran (m)
- I : Kemiringan / slope saluran

Koefisien manning merupakan fungsi dari bahan dinding saluran. Kekasaran dinding dan dasar saluran terbuka tergantung dari jenis material atau kondisi permukaan saluran. Permukaan saluran yang halus, misalnya saluran beton mempunyai nilai kekasaran manning yang berbeda jika dibandingkan dengan

saluran yang terbuat dari pasangan batu kali atau material yang lain. Nilai koefisien manning terdapat dalam Tabel 2.1.

Tabel 2.1 Harga koefisien manning (Sumber :Triatmodjo, 1996)

Nama Bahan	Koefisien Manning
Besi tuang dilapis	0,014
Kaca	0,010
Saluran beton	0,013
Bata dilapis mortar	0,015
Pasangan batu disemen	0,025
Saluran tanah bersih	0,022
Saluran tanah	0,030
Saluran dengan dasar batu dan tebing rumput	0,040
Saluran pada galian batu padas	0,040

2.1.2 Pemodelan Saluran Terbuka

Pemodelan saluran terbuka akan dapat memprediksi kelakuan dan kerja dari suatu bangunan atau mesin yang akan dibuat. Beberapa kekurangan yang belum diperkirakan dan akan terjadi segera diketahui sehingga kekurangan tersebut dapat segera dihindari pada prototip yang akan dibuat. Selain itu, dengan model ini dapat dipelajari beberapa alternatif perencanaan sehingga akan dapat dipilih bangunan atau mesin yang paling optimal (Triatmodjo, 1996 :167).

Bentuk sesungguhnya dari bangunan yang diselidiki disebut prototip dan model bisa lebih besar, sama besar ataupun lebih kecil.

1. Sifat sebangun

Hubungan antara model dan prototip dipengaruhi oleh hukum-hukum sifat sebangun hidrolis. Sifat sebangun ini memperhatikan beberapa aspek yaitu sebangun geometric, sebangun kinematic dan sebangun dinamik. Perbandingan anatara prototip dan model disebut skala model.

a. Sebangun geometrik

Sebangun geometrik yaitu apabila model dan prototip mempunyai bentuk yang sama tetapi berbeda ukuran. Hal ini berarti perbandingan antara ukuran panjang yang bersangkutan seperti kekasaran antara model dan prototip adalah sama. Perbandingan ini disebut skala geometric model n_L :

$$n_L = \frac{\text{ukuran di prototip}}{\text{ukuran di model}} = \frac{L_p}{L_m} \quad (2.5)$$

b. Sebangun kinematik

Sebangun kinematik yaitu apa bila model dan prototip sebangun geomatrik dan perbandingan kecepatan dan percepatan di dua titik yang bersangkutan pada prototip dan model untuk seluruh pengaliran adalah sama.

Besaran kinematik seperti kecepatan, percepatan, debit aliran dan sebagainya dapat diberikan dalam skala panjang dan skala waktu.

1) Skala kecepatan

$$n_V = \frac{V_p}{V_m} = \frac{L_p/T_p}{L_m/T_m} = \frac{n_L}{n_T} \quad (2.6)$$

2) Sakala percepatan

$$n_a = \frac{a_p}{a_m} = \frac{L_p/T_p^2}{L_m/T_m^2} = \frac{n_L}{n_T^2} \quad (2.7)$$

3) Skala debit

$$n_Q = \frac{Q_p}{Q_m} = \frac{L_p^3/T_p}{L_m^3/T_m} = \frac{n_L^3}{n_T} \quad (2.8)$$

c. Sebangun dinamik

Sebangun dinamik yaitu apabila prototip dan model sebangun yang geometrik dan kinematik, serta gaya-gaya yang bersangkutan pada model dan prototip untuk seluruh pengaliran mempunyai perbandingan yang sama dan bekerja pada arah yang sama.

2. Model tak distorsi

Model yang mempunyai skala panjang dan vertikal yang sama disebut model tak distorsi. Pada model tak distorsi bentuk geometri antara model dan prototip adalah sama tetapi beda ukuran dengan suatu perbandingan ukuran atau skala tertentu.

3. Model distorsi

Model distorsi mempunyai skala horizontal dan vertikal berbeda. Pada model distorsi bentuk geometrik antara prototip dan model tidak sama. Model ini banyak dilakukan apabila prototip mempunyai dimensi horizontal yang jauh lebih besar dari dimensi vertikal, seperti sungai, pelabuhan. Dalam hal ini, apabila skala horizontal dan vertikal adalah sama, maka kedalaman air pada model bisa sangat kecil sehingga sulit untuk melakukan pengukuran, disamping juga sifat aliran bisa menjadi tidak sama (aliran pada prototip adalah turbulen sedangkan di model laminar). Solusi untuk menghindari keadaan tersebut, maka skala horizontal dan vertikal dibuat tidak sama.

Apabila skala horizontal adalah n_L dan skala vertikal adalah n_h , maka :

$$\frac{L_p}{L_m} = n_L \quad (2.9)$$

$$\frac{h_p}{h_m} = n_h \quad (2.10)$$

Koefisien distorsi :

$$r = \frac{n_L}{n_h} \quad (2.11)$$

2.1.3 Distribusi Pengukuran Kecepatan Aliran

Kecepatan aliran tidak sama sepanjang tubuh kanal penampang saluran, hal ini melihat dari sisi bentuk kekasaran kanal dan pola penampang. Kecepatan terbesar terletak pada bagian tengah kanal dan bagian atas dari bagian terdalam kanal yang jauh dari seretan friksional pada bagian dinding dan dasar kanal.

Adanya suatu permukaan bebas dan gesekan di sepanjang dinding saluran, maka kecepatan dalam saluran tidak terbagi rata dalam penampang saluran. Kecepatan maksimum dalam saluran tidak terbagi rata dalam penampang saluran. Kecepatan maksimum dalam saluran biasanya terjadi di bawah permukaan bebas sedalam 0,05 sampai 0,25 kali kedalamannya. Semakin dekat ketepi berarti semakin dalam mencapai maksimum.

Distribusi kecepatan pada penampang saluran juga tergantung pada faktor-faktor lain. Seperti bentuk penampang yang tidak lazim, kekasaran saluran dan adanya tekukan-tekukan. Pada arus yang lebar, deras dan dangkal atau saluran yang sangat licin kecepatan maksimum sering terjadi dipermukaan bebas. Kekerasan saluran dapat menyebabkan pertambahan kelengkungan kurva distribusi kecepatan vertikal. Pada tikungan, kecepatan meningkat pada bagian cembung menimbulkan gaya sentrifugal pada aliran. Gerak melingkar pada saluran yang melengkung merupakan gejala yang harus dipertimbangkan dalam perencanaan.

Kondisi aliran dalam saluran terbuka yang rumit berdasarkan kenyataan bahwa kedudukan permukaan yang bebas cenderung berubah sesuai waktu, ruang, kedalaman aliran, debit, kemiringan dasar saluran dan permukaan bebas adalah

tergantung satu sama lain. Kondisi fisik saluran terbuka jauh lebih bervariasi dibandingkan dengan pipa. Kombinasi antara perubahan setiap parameter saluran akan mempengaruhi kecepatan yang terjadi. Di sisi lain perubahan kecepatan tersebut akan menentukan keadaan dan sifat aliran, begitu juga kecepatan yang akan berpengaruh terhadap ketinggian permukaan.

2.2 Metode Particle Image Velocimetry (PIV)

Particle Image Velocimetry adalah satu dari beberapa metode yang dapat digunakan untuk memvisualisasikan dan melakukan pengukuran pada suatu aliran fluida. Penelitian dilakukan dengan teknik foto untuk tidak mengganggu aliran yang akan diteliti. Penelitian dilakukan dengan tujuan untuk mengukur medan aliran pada beberapa titik secara bersamaan.

Particle Image Velocimetry (PIV) merupakan metode pengukuran aliran 2D dengan menggunakan image processing rekaman aliran untuk mengetahui profil kecepatan sesaat pada aliran fluida. Pada prinsipnya metode *PIV* mengandalkan rekaman gambar partikel yang bergerak bersama obyek ukur (*seeder/ tracking*) pada beberapa lokasi yang dapat terukur dengan baik. File gambar hasil rekaman selanjutnya dibaca dan diolah untuk mendapatkan besar dan arah kecepatan pada lokasi-lokasi *seeder/tracking* yang tertangkap oleh kamera dalam rekaman gambar (Rahardjo,dkk, 2011).

Pemilihan jenis partikel yang bergerak bersama objek ukur atau *seeder* merupakan salah satu hal yang penting. Partikel tersebut harus bisa mengalir mengikuti pola aliran air permukaan, sehingga material partikel harus lebih terang daripada air. Partikel yang terlalu terang bisa dipengaruhi oleh aliran udara diatas permukaan air. Selain jenis partikel, ukurannya juga harus dipertimbangkan.

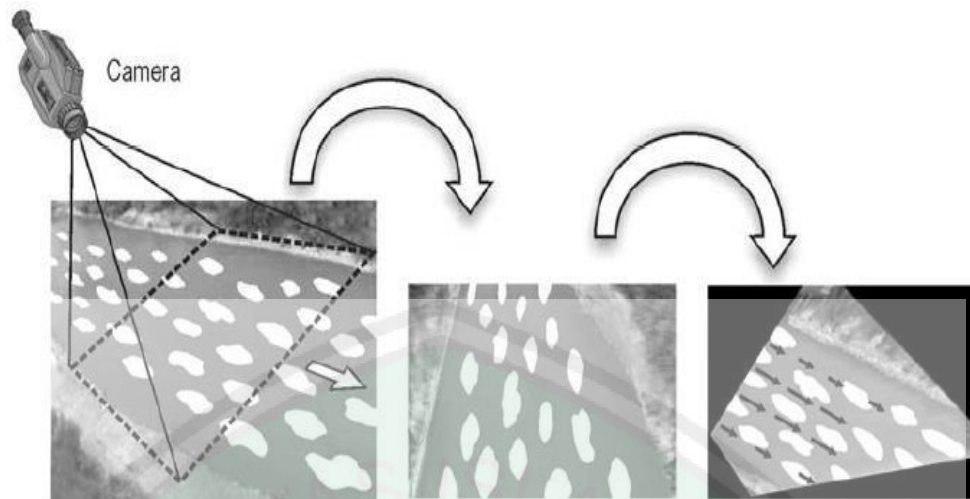
Partikel yang terlalu tidak dapat terlihat oleh kamera atau bisa menimbulkan efek *peak-locking*. Partikel yang terlalu besar dapat mengakibatkan partikelnya tidak bergerak bersama aliran dikarenakan oleh adanya gaya *inertia*. Distribusi partikel yang homogen atau merata pada pengukuran di lapangan atau saluran sangat penting untuk hasil yang baik untuk pendekatan data vektor kecepatan.

Dalam aliran studyVic2D, bahwa penggunaan algoritma korelasi sebagai optimasi untuk menyediakan pembesaran lapangan penuh dan data strain pada spesimen planar yang diterapkan. Pengukuran dalam skala besar untuk mengukur kecepatan aliran dengan metode *Particle Image Velocimetry (PIV)* memiliki perkembangan metode dengan kecakupan sendiri. Area lapangan yang memiliki luasan beratus meter persegi lebih optimal dengan metode *Large-Scale* dari metode *PIV*.

2.2.1 Large-Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV)

Large-scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) adalah metode pendekatan pengukuran kecepatan yang tidak mengganggu aliran pada saluran terbuka di lapangan. Hasil kasaran dari metode *LSPIV* adalah kecepatan permukaan air di lapangan yang didapatkan secara langsung dan bisa mencakup area dengan luasan ratusan meter persegi.

Pengukuran dengan metode *LSPIV* memerlukan beberapa komponen yaitu visualisasi aliran/*seeder*, pencahayaan, perekaman gambar dan pemrosesan dan pengolahan data gambar. Tata letak kamera juga mempengaruhi pengamatan, sehingga diperlukan koreksi geometrik untuk menyamakan asumsi koordinat pada gambar dalam satu referensi. Rangkaian metode pengukuran *LSPIV* dapat terlihat pada Gambar 2.2



(1) Area Pengukuran (2) Gambar Kasaran (3) Gambar Proses

Gambar 2.2 Pengukuran menggunakan LSPIV (Sumber : Muste, 2008)

Dalam Gambar 2.2 diperoleh penjelasan bahwa pengukuran yang dilakukan dengan metode *LSPIV* yaitu dengan cara, (1) memberi tanda atau partikel pada area pengukuran untuk memvisualisasi kondisi aliran (pola putih pada gambar menunjukkan *flow tracking* alami ataupun buatan yang digunakan untuk memvisualisasi aliran terbuka), (2) didapatkan kasaran gambar yang direkam dengan kamera (kondisi terganggu), kemudian (3) gambar transformasi dan *PIV* diproses untuk mendapatkan estimasi vektor kecepatan (kondisi tak terganggu).

Komponen dalam metode pengukuran dengan *LSPIV* ini saling berhubungan satu dengan yang lainnya. Pemilihan salah satu pendekatan akan berpengaruh pada komponen lainnya, seperti pemilihan jenis partikel, ukuran partikel dan penyebaran partikel yang diharapkan/direncanakan yang nantinya akan berpengaruh terhadap hasil output rekaman gambar. Selain itu, penentuan tata letak atau posisi kamera juga akan berpengaruh terhadap banyak/sedikitnya pencahayaannya pada saluran yang dapat berpengaruh terhadap hasil visualisasi

aliran. Penggunaan metode *LSPIV* yang dilakukan di luar ruangan (misalnya di sungai), memiliki kelemahan pada pengaturan pencahayaan yang hanya mengandalkan cahaya alami matahari. Pantulan atau bayangan partikel pada permukaan air, dapat menurunkan kualitas dari hasil gambar (Hauet dk, 2008b dalam muste, 2008). Susunan gambar aliran selama perekaman tergantung pada ketersediaan dari cahaya pencahayaan dan bentuk visualisasi aliran atau *flow tracking* pada permukaan bebas. Ukuran dari gambar setara atau tergantung dari resolusi gambar dan kemampuan untuk membedakan pergerakan dari tampang aliran terhadap pasangan gambar.

2.2.2 Image Pre-processing

Image Pre-processing merupakan pra-pengolahan citra suatu pendekatan umum untuk meningkatkan kualitas pengukuran dengan memperbaiki gambar sebelum korelasi gambar yang sebenarnya terjadi. Pada image pre-processing dilakukan beberapa teknik pemrosesan yang dipilih dan diterapkan pada metode *Particle Image Velocimetry (PIV)*.

1. Histogram

Histogram citra merupakan diagram yang menggambarkan distribusi frekuensi nilai intensitas *pixel* dalam suatu citra. Sumbu horizontal merupakan nilai intensitas *pixel* sedangkan sumbu vertikal merupakan frekuensi atau jumlah *pixel*. Histogram sama dengan *aqualist* (CLAHE) yang sangat mirip dengan *equazier* (CLAHE) dikembangkan untuk meningkatkan kemampuan pencitraan gambar dalam pencitraan medis. CLAHE bekerja di wilayah-wilayah kecil pada gambar. Gambaran spasi dari gambar histogram telah tersebar ke seluruh data (dari 0 sampai 255 dalam gambar 8bit). Oleh karena itu, kawasan yang memiliki tingkat

paparan rendah dengan tingkat paparan yang tinggi dioptimalkan secara independen. CLAHE secara signifikan meningkatkan kemungkinan dalam mendeteksi vektor dalam gambar experimental dengan $4,7 \pm 3 \%$.

2. Intensitas Cahaya

Pencahayaan yang tidak homogen dapat menyebabkan informasi latar belakang frekuensi rendah yang dapat dihilangkan dengan penerapan *filter high-pass*. Seberapa besar *filter* dapat menghemat frekuensi tinggi informasi dari penerangan partikel. *Filter* menekankan informasi partikel dalam gambar dan informasi frekuensi rendah dalam gambar (termasuk semua informasi perpindahan frekuensi rendah).

3. Intensitas *Capping*

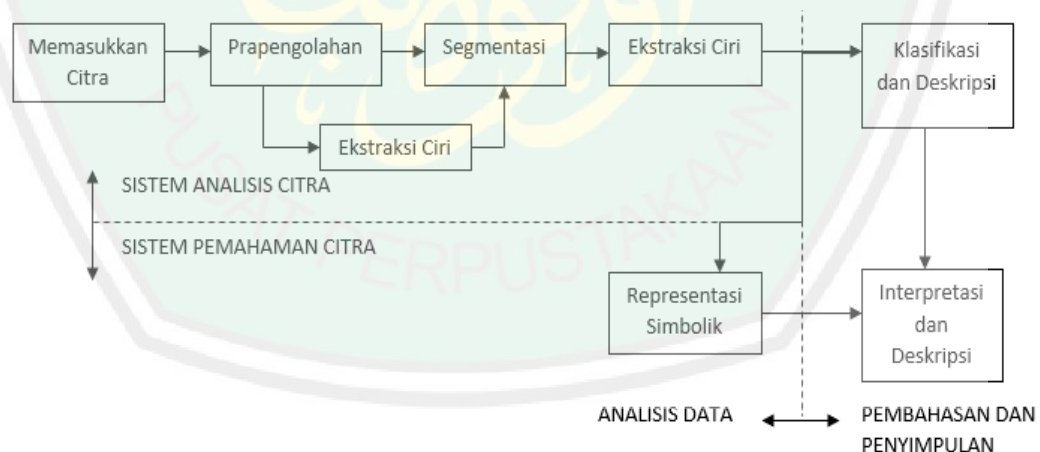
Metode *Particle Image Velocimetry (PIV)* mengasumsikan bahwa semua partikel dalam suatu jendela interogasi memiliki gerakan yang sama. Dalam hal ini menjadi suatu dalam kenyataan, seperti aliran seragam sempurna yang hampir tidak ada. Partikel cerah atau bintang-bintang terang dalam area akan berkontribusi lebih banyak secara statistik pada korelasi sinyal yang mungkin bias akan menghasilkan aliran tidak seragam.

Filter intensitas *capping* menghindari masalah-masalah yang terjadi. Batas intensitas skala abu-abu akan dipilih dan semuanya *pixel* yang melebihi ambang digantikan oleh bagian atas yang membatasi. Oleh karena itu intensitas *capping* tidak sama dengan CLAHE yang hanya sejumlah kecil informasi intensitas *pixel* disesuaikan, sehingga membatasi dampak negatif potensial dari modifikasi gambar. Intensitas *capping* meningkatkan kemungkinan vektor yang valid dalam gambar eksperimental sebesar $5,2 \pm 2,5 \%$.

2.2.3 Pengolahan Citra Digital

Pengolahan citra adalah pemrosesan citra, khususnya dengan menggunakan komputer menjadi citra yang kualitasnya lebih baik. Tujuan pengolahan citra yaitu mempermudah interpretasi yang dilakukan oleh manusia atau mesin (komputer). Teknik-teknik pengolahan citra mentransformasikan citra menjadi citra lain. Jadi, input berupa citra dan outputnya juga berupa citra, akan tetapi output citra memiliki kualitas lebih baik. Secara umum proses di dalam pengolahan citra digital dapat dibagi menjadi tiga aktivitas, yaitu :

1. Memperoleh atau mengakuisisi citra digital.
2. Melakukan teknik komputasi untuk memproses atau memodifikasi data citra (operasi-operasi pengolahan citra).
3. Menganalisis dan menginterpretasi citra dan menggunakan hasil pemrosesan untuk tujuan tertentu, misalnya memandu robot, mengontrol peralatan, mengatur proses manufaktur, dan lain-lain.

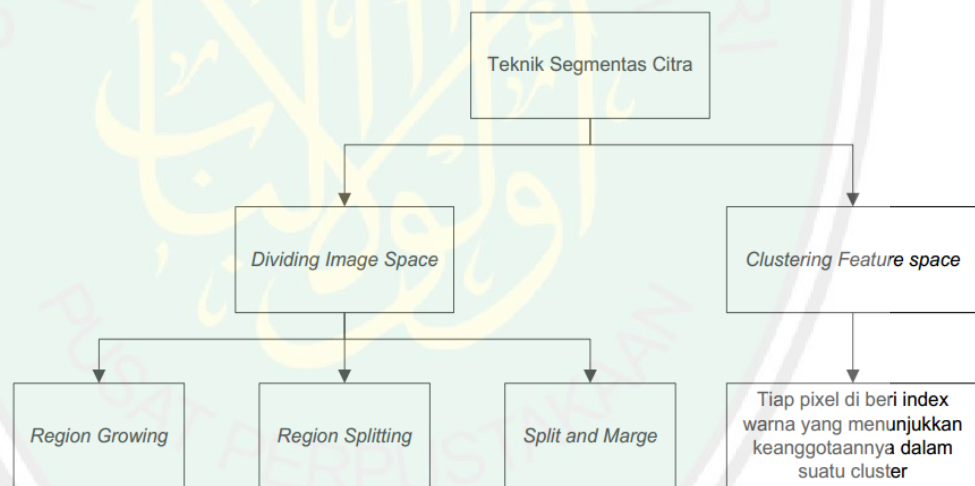


Gambar 2.3 Sistem Pengolahan Citra

Gambar 2.3 menunjukkan sistem pengolahan citra digital yang merupakan proses otomatis dari integrasi sejumlah besar proses untuk persepsi visual diantaranya, akuisisi, pengolahan citra, klasifikasi, pengenalan pola dan membuat keputusan.

2.2.4 Segmentasi

Segmentasi citra adalah suatu proses membagi suatu citra menjadi wilayah-wilayah yang homogen (Jain, 1989). Segmentasi citra dapat dibagi dalam beberapa jenis, yaitu *dividing image space* dan *clustering feature space*. Jenis yang pertama adalah teknik segmentasi dengan membagi image menjadi beberapa bagian untuk mengetahui batasannya, sedangkan teknik yang kedua dilakukan dengan cara memberi index warna pada tiap *pixel* yang menunjukkan keanggotaan dalam suatu segmentasi.



Gambar 2.4 Teknik Segmentasi Citra

Teknik segmentasi tersebut dapat dilakukan dengan beberapa pendekatan sebagai berikut (Pulungan, 2018):

1. Pendekatan Edge-Based

Pendekatan Edge-Based ini melakukan proses deteksi sisi dengan operator *gradient*. Masuknya berupa citra graylevel dan keluarannya

berupa citra *edge* (biner). Kemudian dilakukan proses *region growing* dengan masukan citra asli (*gray-level*) dan citra *edge*. Proses pembentukan suatu wilayah akan berhenti jika menemukan *pixel edge*. Edge-based mempunyai kekurangan yang belum tentu menemukan edge kontinu, sehingga mengakibatkan terjadinya kebocoran dalam suatu wilayah (wilayah-wilayah yang tidak tertutup).

2. Pendekatan Region-Based

Pendekatan ini memerlukan criteria of *uniformity*, memerlukan penyebaran *seeds* atau dapat juga dengan pendekatan scan line, kemudian dilakukan proses *region growing*. Kekurangan pendekatan ini yaitu tidak memiliki kepastian yang menghasilkan wilayah-wilayah yang bersambungan.

3. Pendekatan Hybrid

Pendekatan ini melakukan proses deteksi sisi untuk menghasilkan citra sisi (*pixel edge* dan *pixel non-edge*), melakukan pemisahan wilayah dengan metode *connected region*. (*Connected regions* adalah set *pixel 4-tetanggayang* bukan *pixel edge*), kemudian dilakukan proses merging regions. Pendekatan ini bertujuan untuk mendapatkan hasil segmentasi dengan wilayah-wilayah tertutup dengan bersambungan.

2.2.5 Pengenalan Pola

Pengenalan pola (pattern recognition) adalah suatu ilmu untuk mengklarifikasi atau menggambarkan sesuatu berdasarkan pengukuran kuantitatif fitur (ciri) atau sifat utama dari suatu objek. Pola sendiri adalah suatu entitas yang terdefinisi dan dapat diidentifikasi serta diberi nama. Sidik jari adalah salah satu

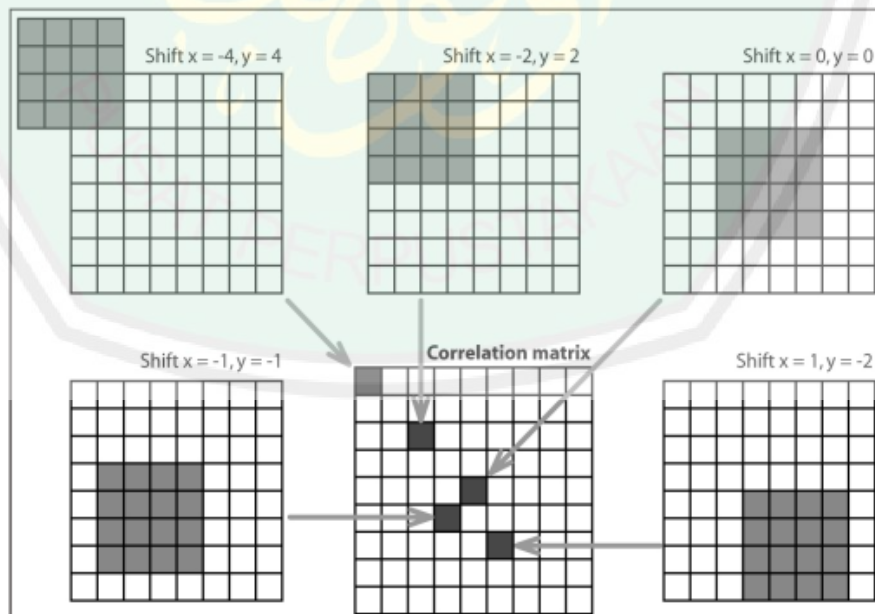
contoh pola. Pola bias merupakan kumpulan dari hasil pengukuran atau pemantauan dan dinyatakan dalam notasi vector atau matriks (Pulungan, 2018).

2.2.6 Image Evalution

Bagian paling sensitif dari analisis *Particle Image Velocimetry* adalah algoritma korelasi silang. Pada sub-gambar kecil-kecil (*interrogation areas*) dari gambar yang terekam dilakukan korelasi silang untuk mendapatkan yang paling memungkinkan perpindahan partikel pada area yang diteliti (*interrogation areas*). Korelasi silang adalah pola statistik yang mencoba pencocokan pola partikel dari area A kembali di area B. Teknik statistik ini diimplementasikan dengan diskrit fungsi lintas korelasi.

$$C(m, n) = \sum_i \sum_j A(i, j) B(i - m, j - n) \quad (2.12)$$

Dimana A dan B berada di tempat interogasi yang sama gambar A dan gambar B. Lokasi puncak koordinat intensitas dalam menghasilkan korelasi matriks C memberikan perpindahan partikel yang paling mungkin dari A ke B.



Gambar 2.5 Matrik Korelasi pada MATLAB.

Ada dua pendekatan umum untuk menyelesaikan persamaan (2.12):

1. Pendekatan yang paling mudah adalah menghitung matriks korelasi dalam domain spasial seperti pada Gambar 2.5 pendekatan ini disebut korelasi silang langsung, gambar partikel pencocokan pola dan penyaringan konvolusi.
2. Pendekatan dengan matriks korelasi dalam domain frekuensi *Discrete Fourier Transformasi (DFT)*. Perhitungan menggunakan *transformasi fourier* cepat. Sehingga perhitungan dapat dilakukan dengan waktu yang singkat.

Muhammad Arifin Sanusi (2004) membuat komputasi aliran fluida dengan algoritma matematis transformasi fourier diskret untuk menghitung korelasi silang. Dimana transformasi diskret ini digunakan sebagai algoritma pengolahan dan analisa sinyal diskret dua dimensi di komputer. Dalam menghitung korelasi silang dan autokorelasi melibatkan dua matriks dari dua citra yang diberikan dan menyelesaikan komputasi dengan *konvolusi linear*.

2.3 Metode Korelasi Silang

Korelasi silang menghitung korelasinya matriks dalam domain spasial. Pada matriks korelasi, interogasi area A dan B dapat memiliki dua ukuran berbeda. Ketika B dipilih dua kali lebih besar dari A, perpindahan partikel dari setengah ukuran A tidak akan mengakibatkan matriks korelasi yang andal dengan rendah kebisingan latar belakang. Matriks korelasi menghasilkan data yang lebih akurat dari pendekatan DFT standar. Kerugian dari matriks korelasi adalah peningkatan biaya komputasi sehubungan dengan pendekatan DFT standar, terutama dengan area interogasi besar (Thickley, 2014).

2.4 Metode Discrete Fourier Transformation

Pendekatan ini menggunakan area interogasi dengan ukuran yang identik. Oleh karena itu, setiap perpindahan partikel menyebabkan beberapa kehilangan informasi yang dapat diperhatikan dengan meningkatnya jumlah kebisingan latar belakang dalam matriks korelasi. Kebisingan latar belakang ini menyulitkan deteksi puncak koordinat intensitas dan mengurangi akurasi. Maka disarankan untuk mengurangi perpindahan menjadi sekitar seperempat dari area interogasi untuk menjaga kebisingan latar belakang dalam matriks korelasi rendah (Thickely, 2014).

Pada dataset *Discrete Fourier Transformation* memiliki beberapa analisis. Integer hasil analisis pertama digunakan untuk mengimbangi area interogasi pada analisis berikutnya. Hilangnya informasi karena perpindahan partikel yang terjadi, maka area interogasi diminimalkan. Kotak interogasi dapat disempurnakan dengan setiap gambar yang dianalisis dengan menghasilkan resolusi spasial tinggi pada peta vektor akhir bersama dengan rentang kecepatan dinamis yang tinggi dan rasio sinyal terhadap noise yang optimal. Dalam aliran *flow*, pola partikel juga menjadi tolak ukur, gerakan partikel yang tidak seragam akan memperluas puncak intensitas dalam matriks korelasi dan memperburuk hasilnya (Namuel, 2018). Berikut merupakan sifat-sifat *Fourier Transformation*.

Tabel 2.2 Sifat-sifat *Fourier Transformation* (Sumber : Namuel, 2018)

No.	Sifat	Ranah Waktu	Ranah Frekuensi
1	Kelanjutan	$af(t) + bg(t)$	$aF(u) + bG(u)$
2	Penskalaan	$f(at)$	$\frac{1}{ a } F(u a)$
3	Pergeseran	$f(t - a)$	$F(u - a)$

Tabel 2.2 Sifat-sifat *Fourier Transformation* (Lanjutan)

No.	Sifat	Ranah Waktu	Ranah Frekuensi
4	Modulasi	$e^{i2\pi at} f(t)$	$F(u)e^{-i2\pi ua}$
5	Konyugasi	$f^*(t)$	$F^*(-u)$
6	Konvolusi	$h(t) = f(t) * g(t)$	$H(u) = F(u)G(u)$
7	Perkalian	$h(t) = f(t)g(t)$	$H(u) = F(u) * G(u)$
8	Diferensiasi	$\frac{d^n f(t)}{dt^n}$	$(i2\pi u)^n F(u)$
9	Simetri	$F(t)$	$f(-u)$
10	Hasil kali dalam	$\int_{-\infty}^{\infty} f(t)g * (t)dt$	$\int_{-\infty}^{\infty} F(u)G * (u)du$

2.5 Penelitian Terkait

2.5.1 Penelitian Terkait Aliran Air di Saluran Terbuka

(Indra Setia Putra, 2015) Dalam jurnalnya melakukan penelitian pengukuran kecepatan aliran dengan menggunakan *currentmeter* dan menggunakan pemilihan kondisi lokasi. Kemudian hasil dari pengukuran *cureentmeter* dilakukan analisis kecepatan. Tujuan penelitian yang dilakukan yaitu untuk mengetahui pengelolaan sungai, pengembangan sungai dan pengendalian daya rusak sungai dengan melakukan pengukuran kecepatan secara langsung untuk mengetahui debit sungai. hasil yang diperoleh yaitu diharuskan memilih lokasi dengan melihat kondisi titik lokasi pengukuran aliran yang akan diukur dan tidak adanya gangguan terhadap aliran air. Waktu yang dibutuhkan dalam pengukuran yaitu 26 jam atau lebih dari satu hari dengan alat bantu penopang agar tidak membuat posisi alat geser.

2.5.2 Penelitian Terkait Pemodelan pada Saluran Terbuka

Mokobombang (Mokobombang, Harsanto & Ikhsan, 2011) melakukan penelitian analisa vektor kecepatan dan pola aliran di sekitar pilar dengan metode *Particle Image Velocimetry (PIV)*. Tujuan penelitian untuk mengetahui distribusi kecepatan aliran permukaan di sekitar pilar dengan melihat fenomena perubahan aliran yang terjadi di sekitar pilar dengan pengamatan visual. Dengan penggunaan partikel *sediment tracking* untuk mendapatkan arah vektor kecepatan. Gambar yang dihasilkan lebih akurat dengan bentuk dan jenis partikel yang menyatu dengan aliran dengan variasi warna yang jelas untuk melihat perpindahan atau pergerakan partikel.

2.5.3 Penelitian Terkait Distribusi Pengukuran Kecepatan Aliran

Penelitian yang dilakukan oleh Prabowo (Prabowo & Irwan, 2008) membuat penelitian tentang pengukuran medan kecepatan aliran permukaan pada model hidraulik fisik Dam Sei Tembesi dengan metode *vector velocity measurement*. Tujuannya untuk mengetahui kecepatan aliran permukaan sebagai stabilisasi pengaruh terhadap ketinggian permukaan. Penelitian dilakukan dengan memanfaatkan perkembangan metode dan piranti lunak pengukuran menggunakan teknologi pengolahan citra dengan komponen objek yang diamati berupa bola-bola berwarna, web came, unit pencahayaan. Dengan luas bidang tangkapan kamera $2800 \times 2100 \text{ mm}^2$ yang direpresentasikan dengan gambar berukuran $640 \times 480 \text{ pixel}$ dan faktor konversi konstan sebesar $4,375 \text{ mm/pixel}$ menunjukkan kesesuaian dengan perhitungan kecepatan aliran permukaan. Maka diperoleh indikasi dengan nilai RSME kedua perhitungan sebesar $0,325 \text{ mm/pixel}$ dan rata-rata error sebesar $0,681\%$ hasil keakurasian perhitungan kecepatan aliran belum dianggap akurat,

salah satu faktor yang mempengaruhi adalah kelemahan metode yang tidak dapat menerima pada aliran kecepatan tinggi.

2.5.4 Penelitian Terkait Metode Particle Image Velocimetry (PIV)

Pada penelitian yang dilakukan oleh Adam Pamudji, Rachmawan & Irwan Eko (2011) menggunakan *Particle Image Velocimetry (PIV)* berbasis pengolahan citra untuk pengukuran aliran 2D. Pengukuran dilakukan dengan menggunakan *image processing* rekaman aliran untuk mengetahui profil kecepatan sesaat aliran fluida. Penelitian ini memiliki proses penyediaan lembar cahaya dengan intensitas sumber cahaya yang tinggi, kualitas partikel optimal dengan melalui proses segmentasi serta logika autokorelasi antar partikel yang sejenis. Proses autokorelasi yang dilakukan memiliki nilai lebih dari 80% kebenaran. Kualitas data pengukuran menghasilkan kesimpulan yang hampir sama dengan pengukuran *Acoustic Doppler Velocity (ADV)* dengan RMSE 3,5%, sehingga penelitian perlu dilakukan kembali untuk menghasilkan data yang akurat dengan tidak mengganggu aliran.

2.5.5 Penelitian Terkait Metode Korelasi Silang

(Kapogianmi & Sakaellaurio, 2017) melakukan penelitian aplikasi *Particle Image Velocimetry (PIV)* dan *Digital Image Correlation (DIC)* untuk mengukur skala model kemiringan. Pengukuran dilakukan dengan implementasi PIV dengan cara melakukan pengujian geoteknis untuk mengumpulkan pemindahan data dari urutan gambar digital yang tertangkap selama tes. Gambar yang dimiliki oleh kamera digital yang telah diambil selama periode deformasi dan perubahan karakteristik dicatat dan dievaluasi. Dengan menggunakan perangkat lunak komputer yang tepat gambar yang cacat dibandingkan dengan gambar

referensi dengan menghubungkan semua *pixel* dan strain distribusi peta dapat dibuat.

2.5.6 Penelitian Terkait Discrete Fourier Transformation (DFT)

(Wasis, 2018) Dalam jurnalnya menerapkan metode DFT untuk mendapatkan sinyal kecepatan dan sinyal simpangan dari data sinyal digital keluaran sensor MEMS *accelometer* yang merupakan sinyal percepatan. Metode yang digunakan yaitu integral fourier domain frekuensi dengan DFT, dengan domain frekuensi tersebut komponen sinyal percepatan diintegrasikan sekali untuk mendapatkan komponen kecepataannya dan diintegrasikan dua kali untuk mendapatkan komponen simpangannya. Selanjutnya dilakukan Transformasi Fourier Balik untuk mendapatkan sinyal kecepatan dan sinyal simpangan dalam domain waktu. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa implementasi teori metode ini memberikan hasil yang cukup baik, khususnya untuk sinyal dengan frekuensi rendah yang direkam dengan kecepatan sampling yang tinggi.

Pada penelitian-penelitian sebelumnya pengukuran kecepatan dilakukan dengan menggunakan alat ukur yang digunakan dalam aliran dan juga pendekatan algoritma korelasi silang secara langsung. Sehingga aliran tersebut dapat dipengaruhi oleh keberadaan alatnya dan juga penggunaan waktu yang tidak efisien untuk mendapatkan informasi dari data digital aliran. Oleh karena itu, pada penelitian ini dilakukan pembaruan dengan pendekatan algoritma FFT (*Fast Fourier Transformation*) pada metode PIV untuk mendapatkan data secara akurasi dalam bentuk domain frekuensi dan penggunaan waktu yang tidak lama.

BAB III

METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tahapan Penelitian

Pada bab ini membahas beberapa hal yang terkait dengan tahapan penelitian yang akan dilakukan, kebutuhan sistem dan penyelesaian masalah pada metode *Particle Image Velocimetry* dalam pengukuran kecepatan aliran terbuka. Adapun tahapan-tahapan yang akan dilakukan dalam penelitian ini akan direpresentasikan pada Gambar 3.1



Gambar 3.1 Tahapan Penelitian

3.2 Studi Literatur

Tahapan ini dilakukan untuk mendapatkan informasi yang berkaitan dengan lingkup pembahasan dalam penelitian, perkembangan mengenai penelitian yang terkait, serta perkembangan metode yang digunakan dalam penelitian yang terkait. Studi literatur yang dilakukan dapat memberikan data, informasi dan fakta

mengenai pengukuran kecepatan aliran terbuka dengan metode *Particle Image Velocimetry* yang menggunakan metode korelasi silang (*Cross-correlation*) dan *Discrete Fourier Transformation* yang akan dikembangkan. Studi literatur yang dilakukan mencakup beberapa referensi sebagai bahan dasar dan pemahaman penelitian yaitu seperti hal-hal dibawah ini :

1. *Particle Image Velocimetry*.
2. *Image pre-processing* yaitu, akuisisi citra, histogram, segmentasi, ekstraksi ciri citra.
3. Metode pendekatan, pengukuran partikel gambar menggunakan metode korelasi silang (*cross-correlation*).
4. Pendekatan matriks korelasi dengan *Discrete Fourier Transformation* untuk menemukan *peak*.
5. Eksplorasi data pengukuran hasil dari *image post-processing*.
6. Evaluasi hasil pengukuran dengan gambar atau *vector maps*.

3.3 Pengumpulan Data

3.3.1 Deskripsi Data

Data yang direkam dengan kamera dioperasikan dalam mode pengambilan gambar berurutan dengan jarak antar pengambilan gambar maksimum 1/40 detik. Data citra tersebut selanjutnya akan diproses dengan pengolahan citra untuk menghitung kecepatan gerakan partikel. Pengukuran diperlukan minimal dua gambar yang terekam dalam selang waktu yang berbeda. Maka perpindahan partikel gambar 1 ke gambar 2 dapat diketahui jarak dan arahnya dengan membagi jarak dan waktu sampling dapat diketahui kecepatan sesaat partikel uji yang dapat merepresentasikan kecepatan aliran.

Data yang akan digunakan dalam penelitian yaitu diambil dari laboratory PIV yang dapat diakses pada website <https://pivlab.blogspot.com>. Data gambar yang diambil yaitu citra berukuran 600x800 dengan format .bmp, gambar ini sudah dilakukan *image preprocessing*. Dalam penggunaan analisis, data citra yang digunakan yaitu berpasangan tidak hanya satu *frame*, akan tetapi menggunakan beberapa *frame* untuk dipasangkan sesuai dengan urutan waktu. Data gambar ini memiliki *frame rate* atau jumlah bingkai *frame* yang ditunjukkan setiap detik dan memiliki satuan *frame per second* (fps). Semakin tinggi nilai *pixel* dalam *frame* maka semakin baik kualitas gambar untuk dianalisis. Oleh karena itu, dalam data yang digunakan untuk penelitian harus memiliki kualitas kontras, pencahayaan dan nilai *pixel* yang baik dan tidak ada *blurring* yang dapat merusak analisis gambar. Sehingga analisis data sistem mendapatkan data yang akurat.

3.3.2 Sampling Rate

Sampling rate adalah berapa banyaknya jumlah sample yang diambil dalam satuan waktu (detik). Kecepatan pengambilan sample harus memenuhi kriteria tertentu. Pada penelitian ini menggunakan format gambar yang diambil merupakan hasil konversi sebuah video menjadi gambar. Sehingga menghasilkan gambar dalam waktu berurutan yang halus dan memiliki interogasi besar. Data yang digunakan untuk percobaan penelitian ini diambil dari laboratory PIV yang memiliki data-data gambar aliran.

Ukuran file yang dibutuhkan memori sesuai dengan format gambar yang digunakan 8 bit. Untuk mengetahui ukuran file maka akan dihitung sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Pixel per frame} &= W \times H \\ &= 640 \times 480 \end{aligned}$$

$$= 307200$$

$$\text{Bit per frame} = \text{Pixel per frame} \times \text{color depth}$$

$$= 307200 \times 24$$

$$= 7372800 \text{ (7,37 Mbit Bit rate)}$$

$$\text{BitRate} = \text{Bit per frame} \times \text{Frame rate}$$

$$= 7,37 \times 30$$

$$= 221,1 \text{ Mbit/sec}$$

Hasil pengambilan gambar tersebut, kemudian dilakukan proses *image preprocessing* untuk mendapatkan gambar yang bisa dianalisis dalam sistem.

Format gambar yang diinputkan dalam sistem PIV yaitu :

Tabel 3.1 Format File yang Digunakan

Nama File	Nama Panjang	Format File
TIFF	Tagged Image File Format	.tif .tiff
JPEG	Join Photographics Expret's Group	.jpeg .jpg
GIF	Graphics Interchange Format	.gif
BMP	Windows Bitmap	.bmp
PNG	Portable Network Grapichs	.png
XWD	X-window Dump	.xwd

3.4 Perancangan Sistem

Tahapan ini menjelaskan mengenai bagaimana sistem yang akan dibuat untuk mempermudah peneliti dalam melakukan implementasi sistem, evaluasi dan analisa hasil yang didapatkan. Perancangan sistem ini memiliki tujuan untuk

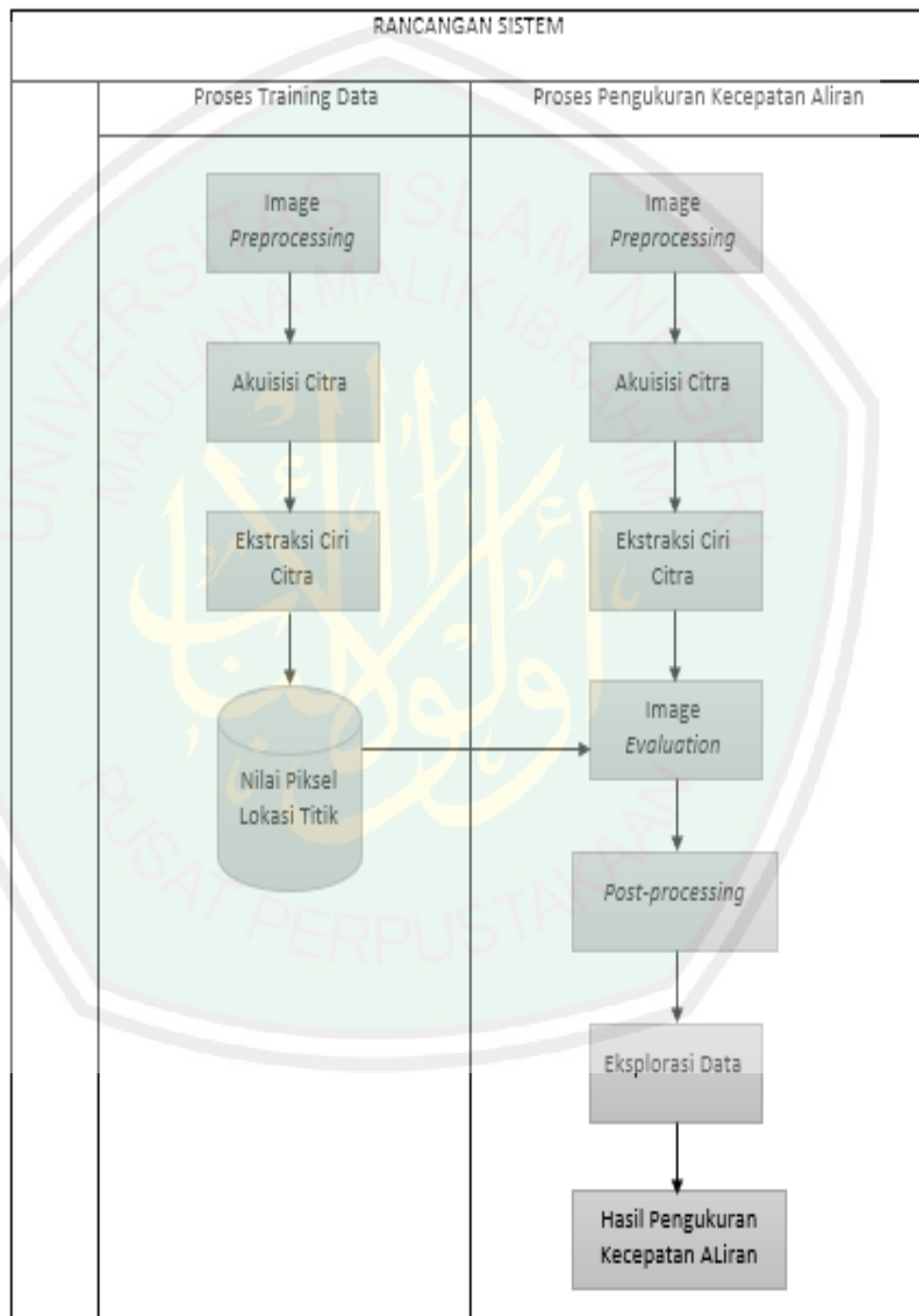
memberikan gambaran apa yang seharusnya dikerjakan sistem dan bagaimana sistem *Particle Image Velocimetry* ini dapat mengukur kecepatan aliran terbuka.

Dalam pembuatan sistem alat ukur kecepatan aliran terbuka ini terdapat proses pengambilan data yang diperoleh dari model fisik saluran aliran terbuka dan dirangkai dengan beberapa perangkat elektrik seperti lampu halogen atau laser sebagai energi pembangkit berkas cahaya. Pengukuran kecepatan dilakukan dengan menaburkan *sediment tracking* atau partikel pada aliran yang sudah stabil. Pergerakan *sediment tracking* direkam dengan kamera digital dengan kualitas *high speed* untuk analisis distribusi kecepatan dan pola aliran.

Proses dalam sistem ini memiliki dua proses utama. Yang pertama adalah proses data training dan kedua adalah proses data testing. Proses data training dimulai dengan hasil rekaman gambar gerakan partikel pada aliran model fisik. Setelah itu *pre-processing* yang terdiri dari proses akuisisi citra, penyeimbangan histogram, intensitas pencahayaan dan intensitas *capping*. *Pre-processing* akan memproses data gambar yang akan dimasukkan pengolahan citra. Selanjutnya, setiap citra yang menghasilkan nilai *pixel* yang mengandung informasi lokasi titik dan data warna atau intensitas kecerahan. Karna mengukur kecepatan atau gerak partikel, maka dilakukan proses testing untuk mengurangi nilai titik pada frame satu dengan nilai titik pada frame yang lain berurutan.

Proses selanjutnya yaitu proses data testing. Proses ini dimulai dari akuisisi citra. Kemudian dilakukan *pre-processing* yang sama seperti proses data training dan dilakukan pengolahan citra. Selanjutnya dilakukan matriks korelasi data training dan hasil pengolahan citra data testing. Hasilnya adalah nilai *pixel* yang akan dilakukan *image evaluation*. Dari *image evaluation* setelah *peak finding*, dapat

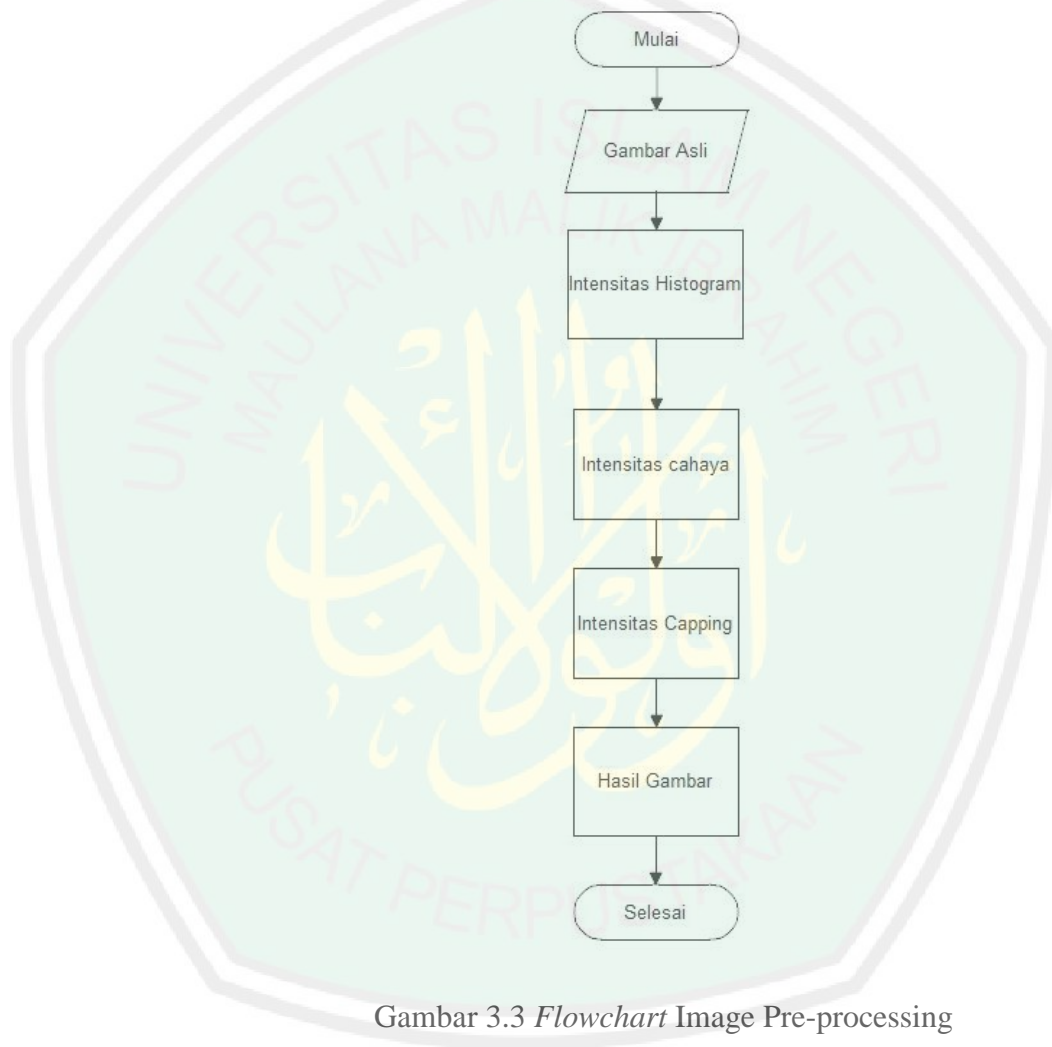
dilakukan validasi, interpolasi dan *smoothing*. Selanjutnya proses dilakukannya eksplorasi data untuk mendapatkan vektor kecepatan. Hasil dari proses tersebut adalah berupa vektor kecepatan aliran yang sesuai dengan pengukuran pada model fisik aliran.



Gambar 3. 2 Rancangan Sistem

3.4.1 Image Pre-Processing

Proses pre-processing merupakan pra-pengolahan citra suatu pendekatan yang dilakukan untuk meningkatkan kualitas pengukuran dengan perbaikan pada gambar sebelum korelasi gambar terjadi. Pada proses ini akan dilakukan beberapa teknik pemrosesan yang diterapkan.



Gambar 3.3 Flowchart Image Pre-processing

1. Keseimbangan Histogram

Histogram citra adalah grafik yang menggambarkan penyebaran nilai-nilai intensitas *pixel* dari suatu citra atau bagian tertentu dalam citra. Dari sebuah histogram dapat diketahui frekuensi kemunculan nisbi (relatif) dari intensitas pada

citra tersebut. Histogram menunjukkan tentang kecerahan (*brightness*) dan kontras (*contrass*) dari sebuah citra. Nilai intensitas histogram dimulai dari 0 hingga 255.

Sumbu horizontal merupakan nilai intensitas *pixel* sedangkan sumbu vertikal merupakan frekuensi atau jumlah *pixel*. Histogram sama dengan aqualist (CLAHE) yang sangat mirip dengan *equazier* (CLAHE) dikembangkan untuk meningkatkan kemampuan pencitraan gambar dalam pencitraan medis. CLAHE bekerja di wilayah-wilayah kecil pada gambar. Gambaran spasi dari gambar histogram telah tersebar ke seluruh data. Oleh karena itu, kawasan yang memiliki tingkat paparan rendah dengan tingkat paparan yang tinggi dioptimalkan secara independen. CLAHE secara signifikan meningkatkan kemungkinan dalam mendeteksi vektor dalam gambar experimental dengan $4,7 \pm 3 \%$.

2. Intensitas Pencahayaan

Pencahayaan yang tidak homogen dapat menyebabkan informasi latar belakang frekuensi rendah yang dapat dihilangkan dengan penerapan filter high-pass. Sebagian besar filter dapat menghemat frekuensi tinggi informasi dari penerangan partikel. Filter menekankan informasi partikel dalam gambar dan informasi frekuensi rendah dalam gambar (termasuk semua informasi perpindahan frekuensi rendah).

3. Intensitas *Capping*

Metode *Particle Image Velocimetry* (PIV) mengasumsikan bahwa semua partikel dalam suatu jendela interogasi memiliki gerakan yang sama. Dalam hal ini menjadi suatu dalam kenyataan, seperti aliran seragam sempurna yang hampir tidak ada. Partikel cerah atau bintik-bintik terang dalam area akan berkontribusi lebih

banyak secara statistik pada korelasi sinyal yang mungkin bias akan menghasilkan aliran tidak seragam.

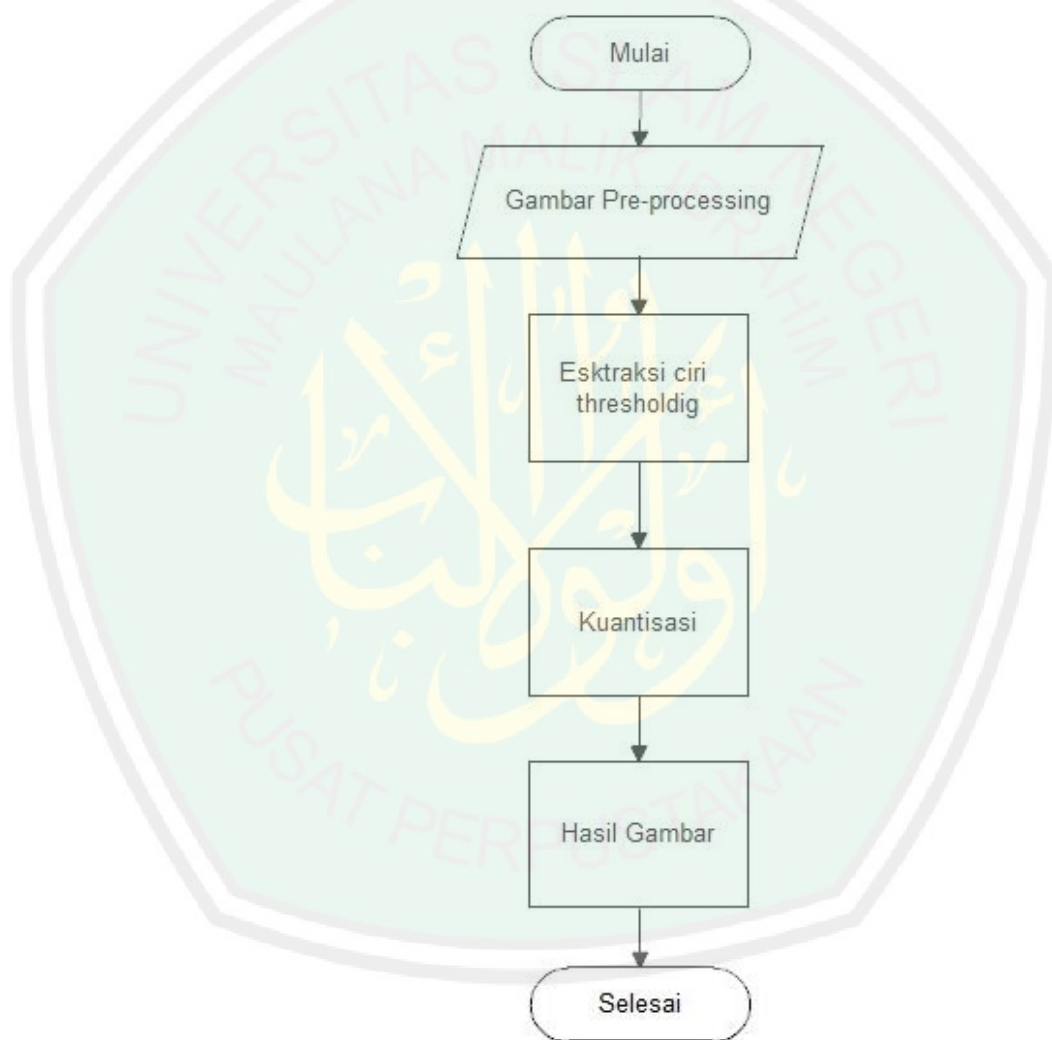
3.4.2 Akuisisi Citra

Sistem visual manusia terdiri dari gabungan proses perekaman dan pendeteksian obyek. Manusia memiliki kemampuan untuk mengenali obyek tertentu dari sekumpulan obyek yang dilihatnya. Selain itu, manusia juga mengetahui penamaan obyek yang akan mempermudah dalam mendeteksi suatu obyek. Kemampuan visual manusia sangat berbeda dengan kemampuan sistem visual mesin. Sistem visual mesin memiliki hasil perekaman alat optik yang tidak dapat diterjemahkan secara langsung, didefinisikan dan dikenali oleh komputer. Oleh karena itu, pada sistem visual mesin dibutuhkan sebuah proses pengolahan citra terlebih dahulu.

Proses pengolahan citra pada tingkatan rendah atau dasar (*low level*) yang dapat digunakan adalah segmentasi. Pada segmentasi ini dilakukan melalui operasi pengambangan atau *thresholding*. Operasi ini dilakukan dalam sub frame dan frame global sesuai dengan keperluan yaitu untuk memisahkan obyek dengan latar belakangnya. Operasi ini dilakukan dengan proses pemisahan *pixel-pixel* berdasarkan derajat keabuan yang dimiliki. *Pixel* yang memiliki derajat keabuan lebih kecil dari nilai batas yang ditentukan akan diberikan nilai 0, sementara *pixel* yang memiliki derajat keabuan yang lebih besar dari batas akan diubah menjadi bernilai 1.

Dalam sebuah citra *monochrome*, sebuah *pixel* diwakili oleh 1 bit data yang berisikan data tentang derajat keabuan yang dimiliki *pixel* tersebut. Data akan berisi 0 apabila *pixel* berwarna hitam dan 1 bila *pixel* berwarna putih. Citra yang memiliki

16 derajat keabuan (mulai dari 0 yang mewakili warna hitam sampai dengan 15 yang mewakili warna putih) direpresentasikan oleh 4 bit data. Sedangkan citra dengan 256 derajat keabuan (nilai dari 0 yang mewakili warna hitam sampai dengan 255 yang mewakili warna putih) direpresentasikan oleh 8 bit data. Secara sederhana, *thresholding* digunakan untuk menghilangkan informasi citra yang memiliki derajat keabuan di bawah nilai *threshold* (T) yang ditentukan.



Gambar 3.4 *Flowchart Citra*

Perhitungan jarak didapatkan dari pergerakan partikel dari gambar *frame* 1 ke gambar *frame* 2 yang dihitung koordinat pada gambar. Distribusi partikel pada

masing-masing gambar diberikan tanda berupa titik berwarna untuk membaca koordinat titik dan juga untuk memilah titik yang akan digunakan sebagai titik pengukuran. Dengan begitu setiap gambar memiliki waktu tempuh partikel dari gambar *frame 1* ke gambar *frame 2*.

3.4.3 Ekstraksi Ciri Citra

Ekstraksi ciri citra merupakan tahapan mengekstrak ciri atau informasi dari objek di dalam citra yang ingin dibedakan dengan objek lainnya. Ciri yang diekstrak kemudian digunakan sebagai parameter masukan untuk membedakan antara objek satu dengan objek lainnya yang dilakukan pada tahapan klasifikasi.

Jenis dari ekstraksi ciri yang umum yaitu sebagai berikut (Jain, 1989):

1. Ekstraksi Ciri Bentuk

Untuk membedakan bentuk objek satu dengan objek lainnya, maka dapat menggunakan parameter yang disebut dengan *eccentricity*. *Eccentricity* merupakan nilai perbandingan antara jarak *foci ellips minor* dengan *foci ellips mayor* suatu objek. *Eccentricity* memiliki rentang nilai 0 hingga 1. Objek yang berbentuk memanjang atau mendekati bentuk garis lurus, nilai *eccentricity*-nya mendekati angka 1, sedangkan objek yang berbentuk bulat, nilai *eccentricity*-nya mendekati angka 0.

2. Ekstraksi Ciri Ukuran

Untuk membedakan ukuran objek satu dengan lainnya dapat menggunakan parameter luas dan keliling. Luas merupakan banyaknya *pixel* yang menyusun suatu objek. Sedangkan keliling merupakan banyaknya *pixel* yang mengelilingi suatu objek.

3. Ekstraksi Ciri Geometri

Ekstraksi ciri geometri merupakan ciri yang dilandaskan pada hubungan antara dua buah titik, garis, atau bidang dalam citra digital. Ciri geometri diantaranya adalah jarak dan sudut. Jarak antara dua buah titik yang menggunakan satuan *pixel* dapat ditentukan dengan persamaan *euclidian*, *minkowski*, *manhattan*, dan lain-lain. Jarak satuan *pixel* tersebut dapat dikonversi menjadi satuan panjang seperti milimeter, centimeter, meter, dan lain-lain dengan cara membaginya dengan resolusi spasial. Sedangkan sudut antara dua buah garis dapat ditentukan dengan perhitungan trigonometri maupun analisi vektor.

4. Ekstraksi Ciri Tekstur

Ciri yang membedakan tekstur objek satu dengan objek lainnya dapat menggunakan statistik orde pertama atau orde kedua. Ciri orde pertama digunakan untuk membedakan tekstur mekrostruktur (perulangan pola lokal secara periodik). Ciri orde pertama antara lain yaitu, *mean*, *variance*, *skewness*, *kurtosis* dan *entropy*. Sedangkan orde kedua didasarkan pada probabilitas hubungan ketetanggaan antara dua *pixel* pada jarak dan orientasi sudut tertentu. Ciri orde dua umumnya digunakan untuk membedakan tekstur mikrostruktur (pola lokal dan perulangan tidak begitu jelas). Ciri orde kedua antara lain yaitu, *angular second moment*, *contrast*, *correlation*, *variance*, *invers different moment*, *entropy*.

5. Ekstraksi Ciri Warna

Untuk membedakan suatu objek dengan ciri warna tertentu dapat menggunakan nilai *hue* yang merupakan representasi dari cahaya tampak (merah, jingga, kuning, hijau, biru, ungu). Nilai *hue* dapat dikombinasikan dengan nilai *saturation* dan *value* yang merupakan tingkat kecerahan suatu warna. Langkah yang dilakukan untuk mendapatkan ketiga nilai tersebut, maka perlu dilakukan konversi ruang warna citra yang semula RGB menjadi HSV.

3.4.4 Nilai Pixel Lokasi Titik

Pada bagian pengolahan citra dengan akuisisi dan ekstraksi ciri citra hal tersebut digunakan untuk memperbaiki kualitas citra untuk dilakukan proses selanjutnya. Perbaikan kualitas citra tersebut membantu untuk pemebrian informasi mengenai nilai *pixel* setiap *frame* untuk mengetahui partikel-partikel yang bergerak mengikuti aliran. Nilai *pixel* lokasi titik atau partikel ini ditunjukkan dalam bentuk matriks seperti berikut :

20	37	40	26	6	0	0	4	19	18	39	14	20	6
40	18	63	48	0	3	15	1	9	20	32	44	24	35
17	24	57	20	3	2	0	7	7	10	52	65	46	41
26	41	113	60	16	20	5	13	15	17	10	43	34	32
16	44	85	73	46	61	34	0	13	24	29	87	55	23
19	6	21	19	26	20	6	0	11	45	54	79	69	60
21	10	0	8	0	39	14	15	14	18	32	57	75	96
34	0	8	0	14	64	101	43	6	12	34	62	109	110
19	12	0	0	3	25	64	65	39	85	72	57	69	46
0	3	0	24	7	16	23	43	54	54	34	29	25	18
3	0	23	26	2	16	8	45	92	52	0	11	15	26
7	25	47	40	22	1	21	19	33	33	8	2	19	17
28	26	95	29	4	0	5	19	0	0	13	6	26	27
44	29	30	9	7	3	4	15	4	0	0	1	6	16

Nilai matriks di atas merupakan matriks 14×14 dari sebuah citra berukuran $14 \times 14 \text{ pixel}$. Setiap nilai *pixel* dari citra yang digunakan akan dilakukan pergeseran nilai untuk dilakukan perhitungan pada proses berikutnya.

3.4.5 Image Evaluation

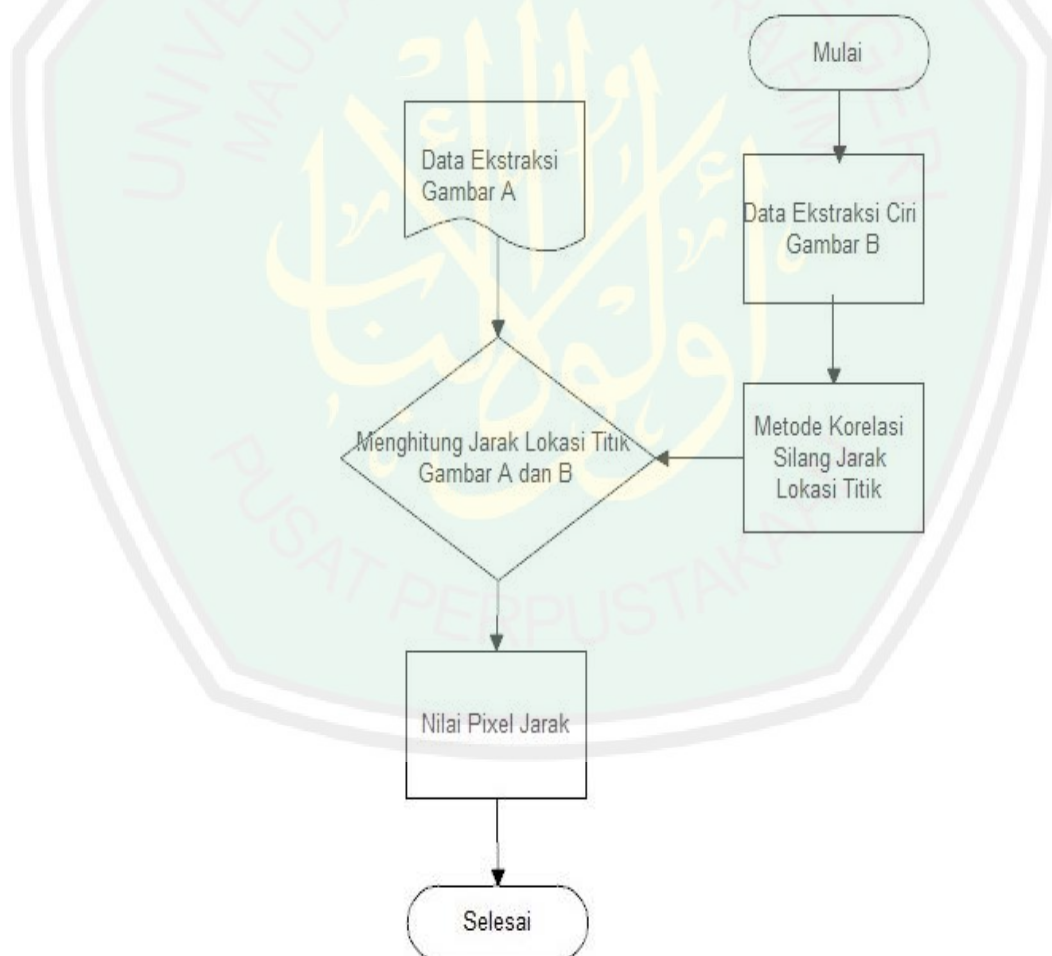
Bagian paling sensitif dari analisis *Particle Image Velocimetry* adalah algoritma korelasi silang. Pada sub-gambar kecil-kecil (*interrogation areas*) dari gambar yang terekam dilakukan korelasi silang untuk mendapatkan yang paling memungkinkan perpindahan partikel pada area yang diteliti (*interrogation areas*). Korelasi silang adalah pola statistik yang mencoba pencocokan pola partikel dari area A kembali di area B. Teknik statistik ini diimplementasikan dengan diskrit fungsi lintas korelasi. Dimana A dan B berada di tempat interogasi yang sama gambar A dan gambar B. Lokasi puncak koordinat intensitas dalam menghasilkan korelasi matriks C memberikan perpindahan partikel yang paling mungkin dari A ke B.

Metode Cross Correlation (Korelasi Silang)

Korelasi silang adalah ukuran kesamaan dua seri sebagai fungsi perpindahan satu relatif ke yang lain. Metode ini dikenal sebagai produk titik geser atau produk dalam geser. Korelasi silang menghitung korelasinya matriks dalam domain spasial. Pada matriks korelasi, interogasi area A dan B dapat memiliki dua ukuran berbeda. Ketika B dipilih dua kali lebih besar dari A, perpindahan partikel dari setengah ukuran A tidak akan mengakibatkan matriks korelasi yang andal dengan rendah kebisingan latar belakang. Matriks korelasi menghasilkan data yang lebih akurat dari pendekatan DFT standar. Kerugian dari

matriks korelasi adalah peningkatan biaya komputasi sehubungan dengan pendekatan DFT standar, terutama dengan area interogasi besar.

Secara sederhana, dalam metode korelasi silang dilakukan pemotongan citra yang pertama dengan ukuran tertentu pada bagian sudut yang telah ditentukan. Selanjutnya setiap potongan dibandingkan pikse per *pixel* dengan citra yang kedua yang tidak dipotong untuk mencari letak persamaan dari kedua citra tersebut. Korelasi silang sifatnya mirip dengan konvolusi dua fungsi. Dalam autokorelasi yang merupakan korelasi silang dari sinyal dengan dirinya sendiri akan selalu ada jeda 0 dan ukurannya akan menjadi energi sinyal.



Gambar 3.5 *Flowchart* Metode Korelasi Silang

Mengukur jarak dengan perhitungan korelasi silang mengetahui variable jarak dan waktu partikel yang bergerak mengikuti pola aliran yang telah didapatkan pada pengolahan gambar. Perhitungan dilakukan dengan menggeser *pixel* per *pixel* gambar A dan gambar B yang akan menghasilkan gambar C.

B(x,y) berukuran 5 x 5 dan A(x,y) berukuran 3 x 3 sebagai berikut :

$$B(x,y) = \begin{bmatrix} 4 & 4 & 3 & 5 & 4 \\ 6 & 6 & 5 & 5 & 2 \\ 5 & 6 & 6 & 6 & 2 \\ 6 & 7 & 5 & 5 & 3 \\ 3 & 5 & 2 & 4 & 4 \end{bmatrix} \quad A(x,y) = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ -1 & 4 & -1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

B(x,y)=

Ket : Tanda (.) menyatakan (0,0) sebuah kernel

B(x,y)*A(x,y)

4	4	3	5	4					
6	6	5	5	2					
5	6	6	6	2					
6	7	5	5	3					
3	5	2	4	4					

Hasil 3 diperoleh dari =

$$(0 \times 4) + (-1 \times 4) + (0 \times 3) + (-1 \times 6) + (4 \times 6) + (-1 \times 5) + (0 \times 5) + (-1 \times 6) + (0 \times 6) = 3.$$

Untuk menghitung nilai sebelahny maka dilakukan dengan menggeser ke kanan satu *pixel* dan dilakukan sama untuk nilai sebelahny. Nilai *pixel* yang bawah

dilakukan dengan menggeser ke bawah satu *pixel* dan mengulangi langkah yang sama seperti sebelumnya sehingga didapatkan hasil sebagai berikut :

3	0	2	maka untuk $C(x,y) =$		4	4	3	5	4
0	2	6			6	3	0	2	2
6	0	2			5	0	2	6	2
					6	6	0	2	3
					3	5	2	4	4

Discrete Fourier Transformation (DFT)

Pendekatan ini menggunakan area interrogasi dengan ukuran yang identik. Oleh karena itu, setiap perpindahan partikel menyebabkan beberapa kehilangan informasi yang dapat diperhatikan dengan meningkatnya jumlah kebisingan latar belakang dalam matriks korelasi. Kebisingan latar belakang ini menyulitkan deteksi puncak koordinat intensitas dan mengurangi akurasi. Maka disarankan untuk mengurangi perpindahan menjadi sekitar seperempat dari area interrogasi untuk menjaga kebisingan latar belakang dalam matriks korelasi rendah.

Pada dataset *Discrete Fourier Transformation* memiliki beberapa analisis. Integer hasil analisis pertama digunakan untuk mengimbangi area interrogasi pada analisis berikutnya. Hilangnya informasi karena perpindahan partikel yang terjadi, maka area interrogasi diminimalkan. Kotak interrogasi dapat disempurnakan dengan setiap gambar yang dianalisis dengan menghasilkan resolusi spasial tinggi pada peta vektor akhir bersama dengan rentang kecepatan dinamis yang tinggi dan rasio sinyal terhadap noise yang optimal. Dalam aliran *flow*, pola partikel juga menjadi

tolak ukur, gerakan partikel yang tidak seragam akan memperluas puncak intensitas dalam matriks korelasi dan memperburuk hasilnya.

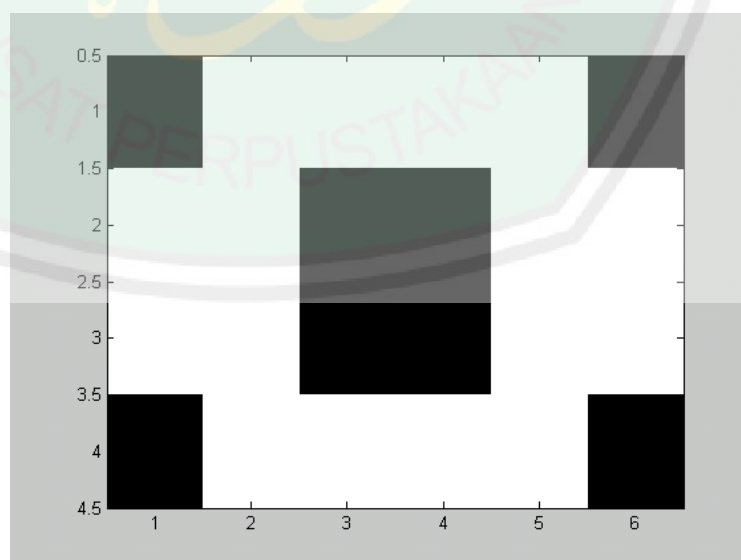
Perhitungan digunakan untuk mengubah domain spasial pada citra menjadi domain frekwensi. Analisa yang digunakan seperti *filtering*. Dengan menggunakan *transformasi fourier* citra dapat dilihat dalam domain frekwensi. Hal ini bertujuan untuk mempercepat waktu perhitungan yang dilakukan dengan metode korelasi silang. Untuk menghitung *Discrete Fourier Transformation* maka perlu dilakukan perhitungan juga dengan *fast fourier transform*.

Pada perhitungan *Transformasi Fourier* dilakukan perhitungan sebagai berikut :

Diket B(x,y) adalah sebagai berikut :

0	1	1	1	1	0
1	1	0	0	1	1
1	1	0	0	1	1
0	1	1	1	1	0

Bila digambarkan hasilnya sebagai berikut :



Gambar 3.6 Contoh citra dalam B(x,y)

DFT dari fungsi tersebut yaitu :

$$F(k_1, k_2) = \sum_{n_1=0}^4 \sum_{n_2=0}^6 f(n_1, n_2) \cdot e^{-j2\pi T(k_1 n_1 / 4 + k_2 n_2 / 6)}$$

Hasil dari DFT adalah sebagai berikut :

16	0	-2 - 3.46i	0	-2 + 3.46i	0
0	-1.27 - 4.73i	0	0	0	4.73 - 1.27i
0	0	0	0	0	0
0	-4.73 + 1.27i	0	0	0	1.27 + 4.73i

Jumlah perhitungan DFT di atas adalah $(4 \times 6)^2 = 576$ kali.

Dengan menggunakan FFT, maka perhitungannya adalah :

(1) Hitung DFT untuk ukuran 4x4 sehingga diperoleh :

$$F(0,0) = 16$$

$$F(0,1) = 0$$

$$F(0,2) = -2 - 3.46i$$

$$F(0,3) = 0$$

$$F(1,0) = 0$$

$$F(1,1) = -1.27 - 4.73i$$

$$F(1,2) = 0$$

$$F(1,3) = 0$$

$$F(2,0) = 0$$

$$F(2,1) = 0$$

$$F(2,2) = 0$$

$$F(2,3) = 0$$

$$F(3,0) = 0$$

$$F(3,1) = -4.73 + 1.27i$$

$$F(3,2) = 0$$

$$F(3,3) = 0$$

(2) Dengan cara konjugate dapat diperoleh :

$$F(0,4) = \text{conjugate}(F(0,2)) = -2 + 3.46i$$

$$F(0,5) = \text{conjugate}(F(0,1)) = 0$$

$$F(1,4) = \text{conjugate}(F(3,2)) = 0$$

$$F(1,5) = \text{conjugate}(F(3,1)) = -4.73 - 1.27i$$

$$F(2,4) = \text{conjugate}(F(2,2)) = 0$$

$$F(2,5) = \text{conjugate}(F(2,1)) = 0$$

$$F(2,4) = \text{conjugate}(F(1,2)) = 0$$

$$F(2,5) = \text{conjugate}(F(1,1)) = -1.27 + 4.73i$$

Jumlah perhitungan dari FFT berukuran $m \times n$ adalah $(m/2+1) \times (n/2+1) \times m \times n + m \times n / 4$

$$= (4/2+1) \times (6/2+1) \times 4 \times 6 + 4 \times 6/4$$

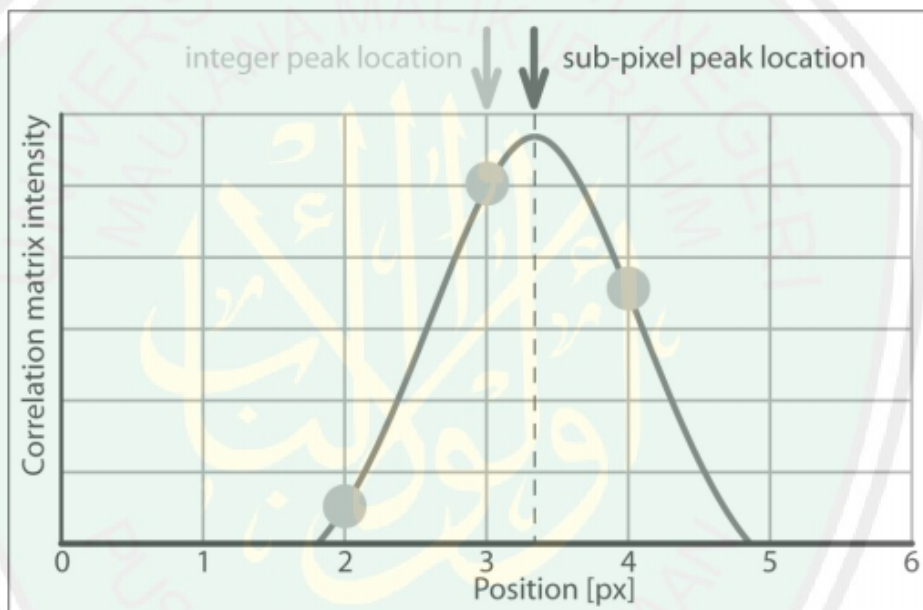
$$= (3 \times 4 \times 4 \times 6) + (4 \times 6/4)$$

$$= 294 \text{ kali}$$

Peak Finding

Proses penemuan puncak koordinat memiliki teknik penemuan yang sama dengan teknik korelasi silang sebagai faktor penting untuk pengukuran menggunakan metode *Particle Image Velocimetry*. Perpindahan bilangan bulat dari dua area introgasi dapat ditentukan langsung dari lokasi puncak intensitas matriks lokasi. Lokasi dapat disempurnakan dengan persis *sub-pixel* menggunakan berbagai metode.

Proses dasar yang dilakukan adalah untuk menyesuaikan fungsi *gaussian* ke distribusi intensitas bilangan bulat. Penggunaan yang diterapkan yaitu vertikal dan horizontal yang berbatasan langsung *pixel* dan mengevaluasi sumbu x dan y secara terpisah. Puncak koordinat digunakan untuk menentukan perpindahan partikel dengan presisi sub-*pixel*. Jika perpindahan partikel dalam interrogasi area terpapar ke geser atau rotasi atau gambar yang harus dibatasi supaya hitungan tidak melebihi atau kurang dari nilai tertentu karena adanya kesalahan hitungan, puncak perpindahan mungkin memiliki bentuk elips.



Gambar 3.7 Fungsi gaussian untuk proses peak finding

3.4.6 Image Post-Processing

Pada proses *Post-processing* data metode *Particle Image Velocimetry* umumnya digunakan untuk mendapatkan hasil yang didapatkan. Metode dasar yang digunakan untuk memfilter *outliers* adalah untuk memilih batas kecepatan yang dapat diterima secara manual. Ambang batas kecepatan juga dapat ditentukan

secara otomatis dengan membandingkan setiap komponen kecepatan dengan ambang bawah dan ambang atas (t_{lower} dan t_{upper}):

$$t_{lower} = \bar{u} - n * \sigma_u \quad (3.1)$$

$$t_{upper} = \bar{u} + n * \sigma_u \quad (3.2)$$

Dimana,

\bar{u} = Kecepatan rata-rata

σ_u = Standar deviasi \bar{u} .

N = Nilai yang ditentukan pengguna menentukan ketatnya dari filter yang digunakan.



Gambar 3.8 *Flowchart Post-Processing*

Interpolasi Data

Setelah dilakukan filter outliers, vektor yang hilang diganti dengan data yang diinterpolasi. Salah satu teknik yang umum adalah interpolasi *neighbourhood*. Sedangkan interpolasi linear atau spline dua dimensi adalah alternatif lain. Metode *Particle Image Velocimetry* menggunakan pemecah nilai batas untuk interpolasi. Pendekatan ini menyediakan interpolasi yang umumnya cukup halus dan diwilayah yang lebih besar dengan data yang hilang. Hal tersebut cenderung ke arah rata-rata batas kecepatan yang mencegah *overshooting*.

Perataan Data

Sejumlah kebisingan pengukuran tertentu tidak dapat dihindari dalam analisis *Particle Image Velocimetry*. Kebisingan dapat dikurangi secara efektif dengan menerapkan perataan data (*smoothing*), Raffael (2007). Metode untuk melakukan perataan data adalah median *filtering* dengan algoritma perataan didasarkan pada aturan-aturan metode kuadrat terkecil.

3.4.7 Data Exploration

Studi metode *Particle Image Velocimetry* menampilkan pola aliran yang sangat kompleks. Kompleksitas yang dimaksud sulit untuk dijelaskan murni dengan vektor peta. Kekuatan *Particle Image Velocimetry* adalah penawaran sejumlah besar kemungkinan untuk memproses lebih lanjut dan menyaring hasilnya. Seperti vortisitas dan divergensi yang dapat dihitung, data dapat diekstraksi dari jalur atau area dan jumlah integral yang dapat dihitung dengan mudah.

3.4.8 Hasil Pengukuran Kecepatan Aliran

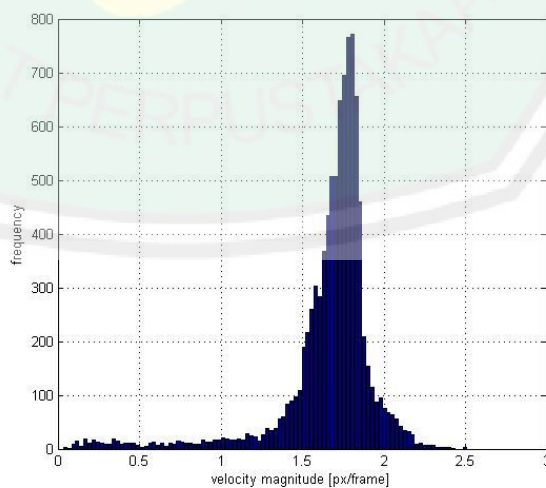
Hasil pengukuran kecepatan diperoleh dari nilai pergeseran *pixel* dari gambar 1 ke gambar lainnya. Kemudian dilakukan perhitungan metode silang yang

akan mendapatkan nilai titik koordinat, jarak dan perpindahan seperti pada Tabel 3.2 berikut :

Tabel 3.2 Hasil Perhitungan Metode Korelasi Silang

No.	Koordinat Titik (cm)				Jarak x (m)	Jarak y (m)	Perpindahan (m)	Kecepatan (m/detik)
	Gambar 1		Gambar 2					
	X	Y	X	Y				
	[1]	[2]	[3]	[4]				
1	30.5	1	32.5	1	0.02	0	0.0200	0.1111
2	30	2.5	31.5	3	0.015	0.005	0.0158	0.0878
3	30	5	36.5	5	0.065	0	0.0650	0.3611
4	29.5	8	34	8	0.045	0	0.0450	0.2500

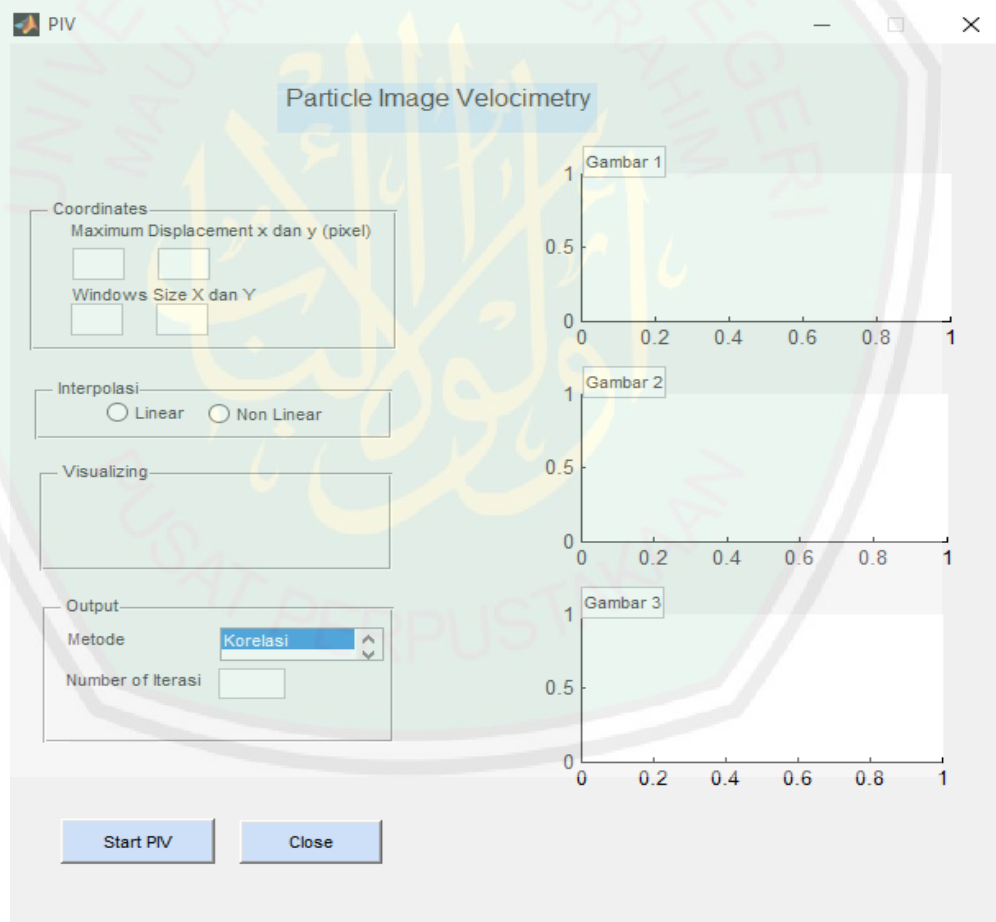
Dalam sistem yang akan dibuat hasil dari besarnya kecepatan akan ditampilkan dalam bentuk frekuensi untuk membaca kecepatan dalam setiap frame yang diperoleh.



Gambar 3.9 Histogram Hasil Pengukuran Kecepatan

3.5 Desain User Interface

Perancangan sistem untuk mengidentifikasi kecepatan aliran terbuka akan diterapkan dengan tampilan *user interface* berbasis *desktop*. Tampilan ini menjelaskan komponen dari gambar A dan Gambar B untuk menemukan puncak titik koordinat dan menampilkan hasil dari visualisasi gambar. Button start PIV digunakan untuk menghasilkan pertemuan Gambar A dan Gambar B yang ditampilkan pada kotak gambar Pict. Sehingga dapat dihitung kecepatan aliran terbuka setelah *peak finding* selesai. Berikut merupakan desain *user interface* sistem *Particle Image Velocimetry* yang digunakan.



Gambar 3.10 Tampilan Sistem PIV

3.6 Metode Pengujian Sistem

Sistem yang akan dibangun merupakan alat ukur yang diharapkan mampu memberikan hasil berupa data kecepatan aliran yang akurat. Sesuai dengan gambar yang dimasukkan pengguna, akan dihasilkan data dari proses data training dan data testing. Ukuran umum yang digunakan untuk mengukur kualitas dari penelitian kecepatan aliran yang menggunakan metode *Particle Image Velocimetry* adalah mengukur dari nilai RMSE (*Root Mean Square Error*). Nilai RMSE mengevaluasi kemampuan sistem untuk membuktikan perhitungan hasil yang telah dilakukan apakah sudah benar atau masih terdapat kesalahan dalam proses perhitungan.

Uji coba dilakukan dengan melakukan pengambilan gambar pada model fisik aliran dan dilanjutkan dengan komputasi gambar pada sistem. Pengujian dilakukan terhadap sejumlah gambar yang dimasukkan, uji coba gambar ke-1 sampai ke-n. Dari setiap uji coba dapat diperoleh nilai titik lokasi dan nilai akurasi perpindahan partikel setiap waktu, sehingga diperoleh hasil kecepatan. Dari nilai-nilai yang dihasilkan dapat digunakan untuk nilai evaluasi kemampuan sistem. RMSE dihitung dengan akar kesalahan rata-rata kuadrat dari nilai model dengan nilai aktual hasil observasi. Ketika menaksir dengan RMSE, performa terbaik secara statistik adalah yang mendekati nol. Berikut persamaan perhitungan RMSE:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N y_i - y^2}{N}} \quad (3.3)$$

Dengan :

- y_i = Nilai aktual data
- y = Nilai hasil peramalan
- N = Jumlah data

BAB IV

UJI COBA DAN PEMBAHASAN

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai implementasi langkah-langkah uji coba dan skenario pengujian sistem terhadap penelitian yang telah dilakukan. Sehingga hasil uji coba penelitian berdasarkan perhitungan menggunakan sistem particle image velocimetry dapat diuraikan pada bab ini. Kemudian akan dijelaskan integrasi penelitian ini dalam islam.

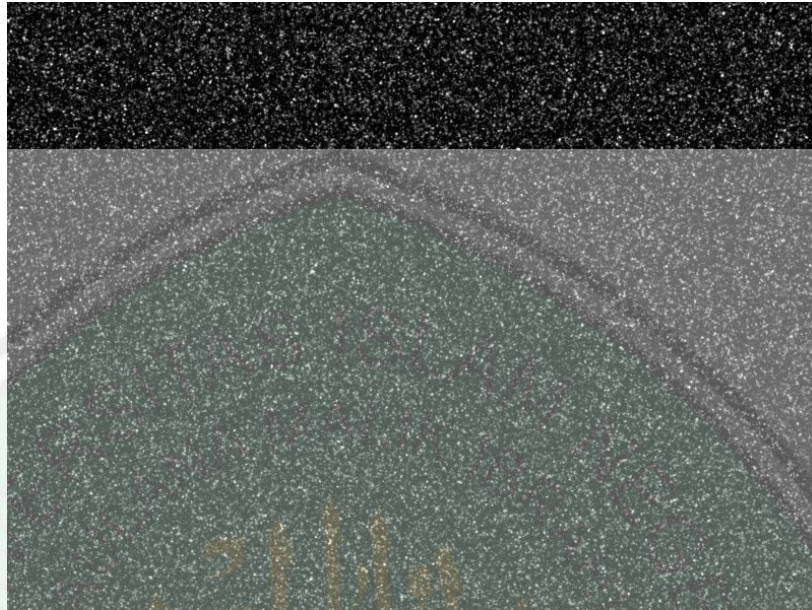
4.1 Langkah Uji Coba

Pengujian pada sistem yang dibangun pada penelitian ini dilakukan untuk mengetahui keakurasian data kecepatan aliran terbuka. Sistem *Particle Image Velocimetry* ini menggunakan metode *Transformasi Fourier* dengan *Fast Fourier Transformasion*. Langkah-langkah tersebut diuraikan sebagai berikut :

4.1.1 Preprocessing Data

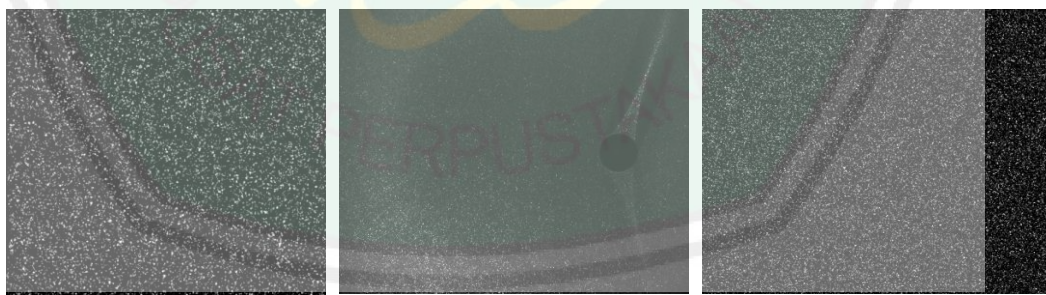
Semua data yang digunakan merupakan hasil pengambilan gambar pada model fisik aliran terbuka. Data diperoleh dari document laboratory PIV yang sudah dilakukan proses *thresholding* atau pengolahan citra. Sebelum dilakukan proses perhitungan kecepatan aliran pada gambar, terlebih dahulu dilakukan *image preprocessing* dalam tahapan sistem untuk meningkatkan kualitas gambar, meningkatkan kontras, sehingga mampu memperbaiki kualitas analisis. Tahapan ini terdiri dari filtering, intensitas capping, CLAHE, penyeimbangan histogram. Untuk penjelasan dari masing-masing proses telah dijelaskan pada bab sebelumnya. *Preprocessing* yang dilakukan pada gambar memiliki periode sampling selama 60

second. contoh data gambar yang diinputkan dalam sistem PIV dapat dilihat pada gambar 4.1 berikut ini.



Gambar 4.1 Data Gambar Input PIV

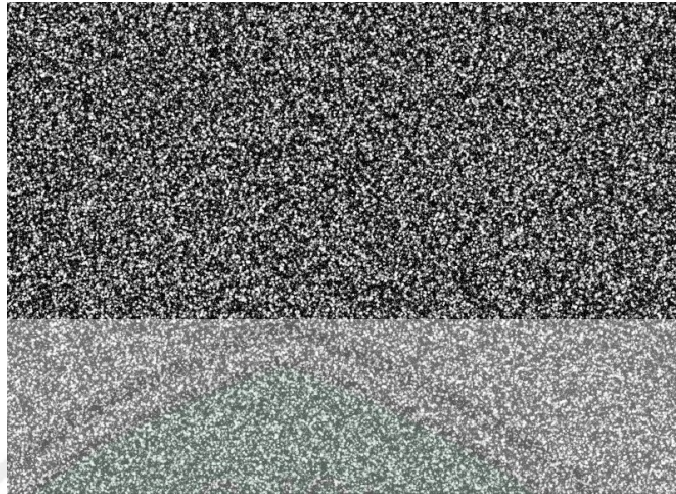
Data input gambar dalam sistem diatur dengan urutan sql 1-2,2-3,... untuk mendapatkan hasil dengan urutan waktu yang beruntun. Pada percobaan ini aliran yang diteliti terdapat tiga bentuk aliran, yaitu aliran pada saluran yang lurus, aliran dengan pengaruh pilar dan aliran pada saluran vortex



1)Aliran Lurus 2)Aliran dengan Pilar 3)Aliran Vortex

Gambar 4.2 Bentuk Aliran untuk Data Input

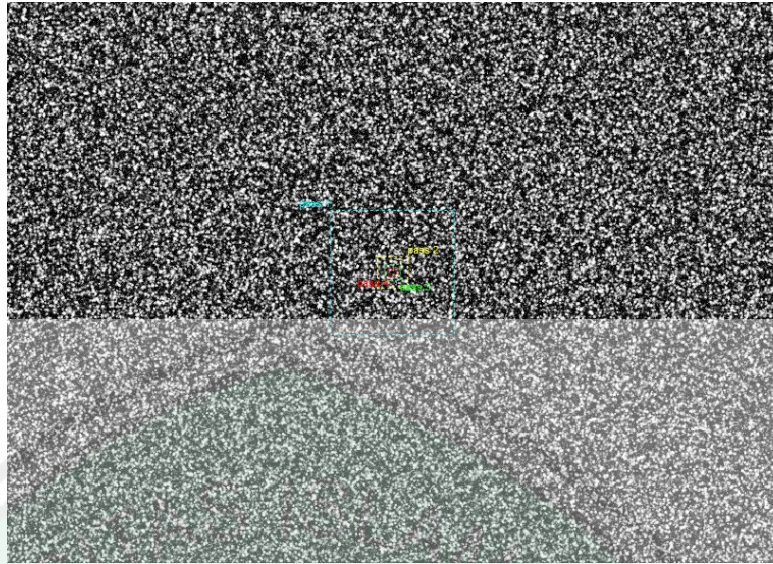
Kemudian data-data tersebut dilkauan perbaikan kualitas citra seperti pada Gambar 4. 2 berikut.



Gambar 4.3 Perbaikan gambar dengan CLAHE

4.1.2 Analisis Pengaturan PIV (*Particle Image Velocimetry*)

Tahapan selanjutnya yaitu analisis pengaturan, yang mengatur korelasi silang pada data gambar. Pengaturan PIV dapat dilakukan dengan dua algoritma pendekatan yaitu, algoritma korelasi silang (*DCC*) dan *Discrete Fourier Transformation* (DFT) yang diselesaikan dengan perhitungan *Fast Fourier Transformation* (FFT). Algoritma *Fast Fourier Transformation* (FFT) dapat digunakan dengan waktu yang cepat dan hasil yang akurat. Dengan menggunakan metode algoritma FFT, data akan dianalisis dalam beberapa lintasan. Lintasan yang pertama menggunakan area interogasi yang relatif besar untuk menghitung perpindahan data gambar. Semakin besar area interogasi, maka semakin baik *rasio signal-to-noise* dan semakin kuat korelasi silang. Akan tetapi, area interogasi yang besar hanya akan memberikan resolusi vektor yang rendah. Sehingga perlu untuk mengurangi ukuran interogasi pada lintasan berikutnya.



Gambar 4.4 Pembagian Lintasan Area Analisis

Lintasan area tersebut kemudian akan dilakukan analisis untuk mengukur jarak dengan perhitungan korelasi silang mengetahui variable jarak dan waktu partikel yang bergerak mengikuti pola aliran. Untuk mengetahui partikel-partikel yang bergerak maka dilakukan perhitungan dengan menggeser *pixel* per *pixel* dari setiap lintasan untuk menghasilkan 1 *frame*.

Berikut perhitungan lintasan dengan matriks 5 x 5 dan fungsi lintasan kedua 3 x 3:

60	16	20	5	13
73	46	61	34	0
19	26	20	6	0
8	0	39	14	15
0	14	64	101	43

Lintasan 1 dengan matriks 5 x 5

0	-1	0
-1	4	-1
0	-1	0

Lintasan Kernel dengan matriks 3 x 3

Lintasan 1 (x,y) * Lintasan kernel (x,y)

60	16	20	5	13
73	46	61	34	0
19	26	20	6	0
8	0	39	14	15
0	14	64	101	43

	9			

Hasil nilai 9 diperoleh dari :

$$(0 \times 60) + (-1 \times 16) + (0 \times 20) + (-1 \times 73) + (4 \times 46) + (-1 \times 61) + (0 \times 19) + (-1 \times 26) + (0 \times 20) = 9.$$

untuk menghitung nilai seteahnya maka dilakukan dengan menggeser ke kanan 1 *pixel* dan dilakukan perkalian dan penjumlahan yang sama. Nilai *pixel* yang bawah dilakukan dengan menggeser ke bawah 1 *pixel* dan menguangi angkah yang sama seperti sebelumnya, sehingga diperoleh hasil sebagai berikut :

60	16	20	5	13
73	9	126	64	0
19	19	52	44	0
8	87	58	101	15
0	14	64	101	43

Karena konvolusi dilakukan per *pixel* dan setiap *pixel* dilakukan operasi perkalian dan penjumlahan, maka akan menghabiskan waktu yang banyak. Oleh karena itu cara mengurangi waktu dilakukan dengan mentransformasi citra dan kernel dalam ranah frekuensi dan dikonvolusikan dalam ranah waktu.

Di dalam pengolahan citra *transformasi fourier* digunakan untuk menganalisis frekuensi pada operasi perbaikan kualitas citra, pengkodean, dan lain-lain. Dari analisis frekuensi, dapat melakukan perubahan frekuensi pada gambar. Perubahan frekuensi berhubungan dengan spektrum antara gambar yang kabur kontrasnya sampai gambar dapat diperinci visualnya. Pada proses pengambilan citra bisa mungkin terjadi pengaburan kontras gambar. Gambar yang mengalami kekaburan kontras perubahan intensitas secara perlahan, yang berartikehilangan informasi frekuensi tinggi. Untuk meningkatkan kualitas gambar, maka digunakan algoritma transformasi fourier dengan pehitungan *Fast Fourier Transformation* untuk meringkas perhitungan dari *Discrete Fourier Transformation* (n^2) kali

menjadi $(n/2 + 1) \times n + n/2$ kali perhitungan. Berikut merupakan perhitungan algoritma *Discrete Fourier Transformation* 2 dimensi dan dikompleksitaskan dengan *Fast Fourier Transformation* pada data citra yang digunakan.

Discrete Fourier Transformation dari $f(x,y)$ disimbolkan $F(u,v)$, dengan persamaan :

$$f(x, y) = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(u, v) \times e^{j2\pi(\frac{ux}{M} + \frac{vy}{N})} \quad (4.1)$$

Untuk $u = 0, 1, 2, \dots, M-1$ dan $v = 0, 1, 2, \dots, N-1$. Fungsi eksponensial dapat diubah menjadi fungsi cosinus dan sinus dengan variable baru u dan v yang menentukan nilai frekuensinya. Domain frekuensi adalah sistem koordinat yang dibangun oleh $F(u,v)$, dimana u dan v sebagai variable (frekuensi). Nilai $F(u,v)$ dalam persamaan di atas disebut sebagai koefisien *Fourier* dari *ekspansi*. Nilai dari transformasi di titik asal dari domain frekuensi $F(0,0)$ disebut component dc dari *Fourier Transformation*, dimana dc menyatakan *direct current*. Meskipun jika $f(x,y)$ adalah fungsi real, secara umum transformasinya adalah kompleks. Sedangkan metode dasar untuk menganalisis transformasi visualnya adalah menghitung nilai spektrumnya.

Kemudian, korelasi silang didapatkan dari *Fast Fourier Transformation* berbalik untuk mengetahui perpindahan titik.

$$r = F^{-1} \quad (4.2)$$

Dari pemfilteran algoritma FFT dan korelasi, maka dilakukan perhitungan untuk mendapatkan perpindahan jarak dan mendapatkan hasil kecepatan aliran. Hasil diperoleh sebagai tabel berikut :

Tabel 4.1 Perhitungan Kecepatan

No.	Koordinat Titik (cm)				Jarak x (m)	Jarak y (m)	Perpindahan (m)	Kecepatan (m/detik)
	Gambar 1		Gambar 2					
	X	Y	X	Y				
	[1]	[2]	[3]	[4]				
					$[5]=([1]-[3])/100$	$[6]=([2]-[4])/100$	$[7]=\sqrt{[5]^2 + [6]^2}$	$[8]=[7]/t$
1	243.9	152.2	284.9	411.5	0.41	2.59	5.348	0.02067
2	576.8	166.9	582.7	432	0.059	2.651	7.031	0.02651
3	83.8	290.7	388.2	292.6	3.04	1.9	12.851	0.0422
4	415.7	296.6	686.6	290.7	2.709	0.059	5.635	0.0207

Perhitungan kecepatan pada Tabel 4.1 dapat dijelaskan bahwa, pada kolom gambar 1 dan 2 merupakan gambar input yang dihasilkan dalam waktu pengambila yang beruntun dan dijadikan satu *frame*. Titik koordinat dari gambar 1 dan 2 digunakan untuk mengetahui jarak dan perpindahan titik koordinat partikel. Kemudian dari hasil jarak dan perpindahan titik koordinat gambar, dilakukan perhitungan kecepatan yang dihasilkan dari waktu yang sudah dilakukan selama pengambilan gambar.

4.1.3 Analisis Visualisasi Pengaturan PIV (*Particle Image Velocimetry*)

Visualisasi algoritma Fast Fourier Transform (FFT) dari matriks gambar dilakukan dengan fungsi analisis sistem PIV. Pada fungsi berikut merupakan penyeleksian area yang akan dianalisis.

```
function [xtable ytable utable vtable typevector] = piv_FFTmulti
(imagel,image2,interrogationarea, step, subpixfinder, mask_inpt,
roi_inpt,passes,int2,int3,int4,imdeform,repeat,mask_auto)
warning off
```

```

if numel(roi_inpt)>0
    xroi=roi_inpt(1);
    yroi=roi_inpt(2);
    widthroi=roi_inpt(3);
    heightroi=roi_inpt(4);

    image1_roi=double(image1(yroi:yroi+heightroi,xroi:xroi+widthroi));

    image2_roi=double(image2(yroi:yroi+heightroi,xroi:xroi+widthroi));
else
    xroi=0;
    yroi=0;
    image1_roi=double(image1);
    image2_roi=double(image2);
end
gen_image1_roi = image1_roi;
gen_image2_roi = image2_roi;

if numel(mask_inpt)>0
    cellmask=mask_inpt;
    mask=zeros(size(image1_roi));
    for i=1:size(cellmask,1);
        masklayerx=cellmask{i,1};
        masklayery=cellmask{i,2};
        mask = mask + poly2mask(masklayerx-xroi,masklayery-
yroi,size(image1_roi,1),size(image1_roi,2));
        %kleineres eingangsbild und maske geshiftet
    end
else
    mask=zeros(size(image1_roi));
end
mask(mask>1)=1;
gen_mask = mask;

miniy=1+(ceil(interrogationarea/2));
minix=1+(ceil(interrogationarea/2));
maxiy=step*(floor(size(image1_roi,1)/step))-(interrogationarea-
1)+(ceil(interrogationarea/2)); %statt size deltax von ROI nehmen
maxix=step*(floor(size(image1_roi,2)/step))-(interrogationarea-
1)+(ceil(interrogationarea/2));

numelementsy=floor((maxiy-miniy)/step+1);
numelementsx=floor((maxix-minix)/step+1);

LAy=miniy;
LAx=minix;
LUy=size(image1_roi,1)-maxiy;
LUx=size(image1_roi,2)-maxix;
shift4centery=round((LUy-LAy)/2);
shift4centerx=round((LUx-LAx)/2);

```

Shift4center akan menjadi negatif dalam kasus unshifted, batas kiri lebih besar dari batas kanan, karena vectormatrix tidak terpusat pada gambar. Matriks tidak dapat digeser lebih ke arah batas kiri, karena image2_crop akan memiliki

indeks negatif. Satu-satunya cara untuk memusatkan matriks adalah dengan menghapus kolom vektor di sisi kanan. Tapi kemudian, akan memilih lebih sedikit data.

```
if shift4centery<0
    shift4centery=0;
end
miniy=miniy+shift4centery;
minix=minix+shift4centerx;
maxix=maxix+shift4centerx;
maxiy=maxiy+shift4centery;

image1_roi=padarray(image1_roi,[ceil(interrogationarea/2)
ceil(interrogationarea/2)], min(min(image1_roi)));
image2_roi=padarray(image2_roi,[ceil(interrogationarea/2)
ceil(interrogationarea/2)], min(min(image1_roi)));
mask=padarray(mask,[ceil(interrogationarea/2)
ceil(interrogationarea/2)],0);
```

Fungsi untuk peripindahan subpixel.

```
if (rem(interrogationarea,2) == 0)
    SubPixOffset=1;
else
    SubPixOffset=0.5;
end
xtable=zeros(numelementsy,numelementsx);
ytable=xtable;
utable=xtable;
vtable=xtable;
typevector=ones(numelementsy,numelementsx);
```

Kemudian dilakukan looping atau perulangan.

```
try
    handles=guihandles(getappdata(0,'hgui'));
    GUI_avail=1;
catch
    GUI_avail=0;
end
```

Membuat ukuran lintasan untuk mengetahui perpindahan partikel dalam gambar dengan lintasan gambar yang kedua mempunyai ukuran lebih kecil.

```
s0 = (repmat((miniy:step:maxiy) '-1, 1,numelementsx) +
repmat(((minix:step:maxix)-1)*size(image1_roi, 1),
numelementsy,1))';
s0 = permute(s0(:), [2 3 1]);
s1 = repmat((1:interrogationarea)',1,interrogationarea) +
repmat(((1:interrogationarea)-1)*size(image1_roi,
1),interrogationarea,1);
```

```
ss1 = repmat(s1, [1, 1, size(s0,3)])+repmat(s0,
[interrogationarea, interrogationarea, 1]);
```

```
image1_cut = image1_roi(ss1);
image2_cut = image2_roi(ss1);
```

Fungsi algoritma FFT.

```
result_conv =
fftshift(fftshift(real(ifft2(conj(fft2(image1_cut)).*fft2(image2_c
ut))), 1), 2);
```

Selanjutnya, melakukan korelasi untuk mengetahui kecepatan aliran dari perpindahan partikel.

```
if repeat == 1s
    ms=round(step/4);
    s0B = (repmat((miniy+ms:step:maxiy+ms)'-1, 1,numelementsx) +
repmat(((minix-ms:step:maxix-ms)-1)*size(image1_roi, 1),
numelementsy,1))';
    s0B = permute(s0B(:), [2 3 1]);
    s1B = repmat((1:interrogationarea)',1,interrogationarea) +
repmat(((1:interrogationarea)-1)*size(image1_roi,
1),interrogationarea,1);
    ss1B = repmat(s1B, [1, 1, size(s0B,3)])+repmat(s0B,
[interrogationarea, interrogationarea, 1]);
    image1_cutB = image1_roi(ss1B);
    image2_cutB = image2_roi(ss1B);
    result_convB =
fftshift(fftshift(real(ifft2(conj(fft2(image1_cutB)).*fft2(image2_
cutB))), 1), 2);

    s0C = (repmat((miniy+ms:step:maxiy+ms)'-1, 1,numelementsx) +
repmat(((minix+ms:step:maxix+ms)-1)*size(image1_roi, 1),
numelementsy,1))';
    s0C = permute(s0C(:), [2 3 1]);
    s1C = repmat((1:interrogationarea)',1,interrogationarea) +
repmat(((1:interrogationarea)-1)*size(image1_roi,
1),interrogationarea,1);
    ss1C = repmat(s1C, [1, 1, size(s0C,3)])+repmat(s0C,
[interrogationarea, interrogationarea, 1]);
    image1_cutC = image1_roi(ss1C);
    image2_cutC = image2_roi(ss1C);
    result_convC =
fftshift(fftshift(real(ifft2(conj(fft2(image1_cutC)).*fft2(image2_
cutC))), 1), 2);

    s0D = (repmat((miniy-ms:step:maxiy-ms)'-1, 1,numelementsx) +
repmat(((minix-ms:step:maxix-ms)-1)*size(image1_roi, 1),
numelementsy,1))';
    s0D = permute(s0D(:), [2 3 1]);
    s1D = repmat((1:interrogationarea)',1,interrogationarea) +
repmat(((1:interrogationarea)-1)*size(image1_roi,
1),interrogationarea,1);
```

```

        ss1D = repmat(s1D, [1, 1, size(s0D,3)]) + repmat(s0D,
[interrogationarea, interrogationarea, 1]);
        image1_cutD = image1_roi(ss1D);
        image2_cutD = image2_roi(ss1D);
        result_convD =
fftshift(fftshift(real(ifft2(conj(fft2(image1_cutD)).*fft2(image2_
cutD))), 1), 2);

        s0E = (repmat((miniy-ms:step:maxiy-ms)'-1, 1,numelementsx) +
repmat(((minix+ms:step:maxix+ms)-1)*size(image1_roi, 1),
numelementsy,1))';
        s0E = permute(s0E(:), [2 3 1]);
        s1E = repmat((1:interrogationarea)',1,interrogationarea) +
repmat(((1:interrogationarea)-1)*size(image1_roi,
1),interrogationarea,1);
        ss1E = repmat(s1E, [1, 1, size(s0E,3)]) + repmat(s0E,
[interrogationarea, interrogationarea, 1]);
        image1_cutE = image1_roi(ss1E);
        image2_cutE = image2_roi(ss1E);
        result_convE =
fftshift(fftshift(real(ifft2(conj(fft2(image1_cutE)).*fft2(image2_
cutE))), 1), 2);

result_conv=result_conv.*result_convB.*result_convC.*result_convD.
.*result_convE;

end
if mask_auto == 1

```

Fungsi untuk mengganti pusat matriks 3 x3 dengan nilai rata-rata atau tidak ada autokorelasi.

```

        h = fspecial('gaussian', 3, 1.5);
        h=h/h(2,2);
        h=1-h;
        h=repmat(h,1,1,size(result_conv,3));
        h=h.*result_conv((interrogationarea/2)+SubPixOffset-
1:(interrogationarea/2)+SubPixOffset+1,(interrogationarea/2)+SubPi
xOffset-1:(interrogationarea/2)+SubPixOffset+1,:);
        result_conv((interrogationarea/2)+SubPixOffset-
1:(interrogationarea/2)+SubPixOffset+1,(interrogationarea/2)+SubPi
xOffset-1:(interrogationarea/2)+SubPixOffset+1,:)=h;
end
minres = permute(repmat(squeeze(min(min(result_conv))), [1,
size(result_conv, 1), size(result_conv, 2)]), [2 3 1]);
deltares = permute(repmat(squeeze(max(max(result_conv))-
min(min(result_conv))), [ 1, size(result_conv, 1),
size(result_conv, 2)]), [2 3 1]);
result_conv = ((result_conv-minres)./deltares)*255;

menerapkan mask
ii = find(mask(ss1(round(interrogationarea/2+1),
round(interrogationarea/2+1), :)));
jj = find(mask((miniy:step:maxiy)+round(interrogationarea/2),
(minix:step:maxix)+round(interrogationarea/2)));
typevector(jj) = 0;

```

```
result_conv(:,:,ii) = 0;
```

```
[y, x, z] = ind2sub(size(result_conv), find(result_conv==255));
```

Dalam gambar berpasangan hanya dibutuhkan satu titik puncak untuk mengetahui acuan titik.

```
[z1, zi] = sort(z);
dz1 = [z1(1); diff(z1)];
i0 = find(dz1~=0);
x1 = x(zi(i0));
y1 = y(zi(i0));
z1 = z(zi(i0));

xtable = repmat((minix:step:maxix)+interrogationarea/2,
length(miniy:step:maxiy), 1);
ytable = repmat(((miniy:step:maxiy)+interrogationarea/2)', 1,
length(minix:step:maxix));

if subpixfinder==1
    [vector] = SUBPIXGAUSS (result_conv,interrogationarea, x1, y1,
z1, SubPixOffset);
elseif subpixfinder==2
    [vector] = SUBPIX2DGAUSS (result_conv,interrogationarea, x1,
y1, z1, SubPixOffset);
end
vector = permute(reshape(vector, [size(xtable') 2]), [2 1 3]);

utable = vector(:,:,1);
vtable = vector(:,:,2);
```

Menentukan banyak operan, jika yang didapatkan adalah nilai 0 maka tidak berhasil.

```
for multipass=1:passes-1

    if GUI_avail==1
        set(handles.progress, 'string' , ['Frame progress: '
int2str(j/maxiy*100/passes+((multipass-1)*(100/passes))) '%']
sprintf('\n') 'Validating velocity field']);drawnow;
    else
        fprintf('.');
    end

    utable_orig=utable;
    vtable_orig=vtable;
    stdthresh=4;
    meanu=nanmean(nanmean(utable));
    meanv=nanmean(nanmean(vtable));
    std2u=nanstd(reshape(utable,size(utable,1)*size(utable,2),1));
    std2v=nanstd(reshape(vtable,size(vtable,1)*size(vtable,2),1));
    minvalu=meanu-stdthresh*std2u;
```

```

maxvalu=meanu+stdthresh*std2u;
minvalv=meanv-stdthresh*std2v;
maxvalv=meanv+stdthresh*std2v;
utable(utable<minvalu)=NaN;
utable(utable>maxvalu)=NaN;
vtable(vtable<minvalv)=NaN;
vtable(vtable>maxvalv)=NaN;

```

Kemudian menghitung ulang koordinat gambar dan melakukan perhitungan.

```

function [vector] = SUBPIX2DGAUSS(result_conv, interrogationarea,
x, y, z, SubPixOffset)
xi = find(~((x <= (size(result_conv,2)-1)) & (y <=
(size(result_conv,1)-1)) & (x >= 2) & (y >= 2)));
x(xi) = [];
y(xi) = [];
z(xi) = [];
xmax = size(result_conv, 2);
vector = NaN(size(result_conv,3), 2);
if (numel(x)~=0)
    c10 = zeros(3,3, length(z));
    c01 = c10;
    c11 = c10;
    c20 = c10;
    c02 = c10;
    ip = sub2ind(size(result_conv), y, x, z);

    for i = -1:1
        for j = -1:1

```

Regresi Gaussian dua dimensi digunakan untuk perpindahan sub-pixel.

Berikut merupakan estimasi dalam velocimetry gambar partikel atau posisi partikel

dan estimasi dalam velocimetry pelacakan partikel.

```

        c10(j+2,i+2, :) = i*log(result_conv(ip+xmax*i+j));
        c01(j+2,i+2, :) = j*log(result_conv(ip+xmax*i+j));
        c11(j+2,i+2, :) = i*j*log(result_conv(ip+xmax*i+j));
        c20(j+2,i+2, :) = (3*i^2-
2)*log(result_conv(ip+xmax*i+j));
        c02(j+2,i+2, :) = (3*j^2-
2)*log(result_conv(ip+xmax*i+j));
    end
end
c10 = (1/6)*sum(sum(c10));
c01 = (1/6)*sum(sum(c01));
c11 = (1/4)*sum(sum(c11));
c20 = (1/6)*sum(sum(c20));
c02 = (1/6)*sum(sum(c02));

deltax = squeeze((c11.*c01-2*c10.*c02)./(4*c20.*c02-c11.^2));
deltay = squeeze((c11.*c10-2*c01.*c20)./(4*c20.*c02-c11.^2));
peakx = x+deltax;
peaky = y+deltay;

```

```

SubpixelX = peakx-(interrogationarea/2)-SubPixOffset;
SubpixelY = peaky-(interrogationarea/2)-SubPixOffset;

vector(z, :) = [SubpixelX, SubpixelY];
end

```

Setelah mendapatkan perhitungan dari algoritma FFT. Kemudian menganalisis PIV (*Particle Image Velocimetry*) dengan jumlah 4 frame dan gaya squel 1-2,2-3,3-4 dan menggunakan waktu sebanyak 00:00:21 dengan lintasan pass gambar 128, 64, 32, 16, 8.

```

function AnalyzeAll_Callback(~, ~, ~)
ok=checksettings;
if ok==1
    handles=gethand;
    filepath=retr('filepath');
    filename=retr('filename');
    resultslist=cell(0); %clear old results
    toolsavailable(0);
    set(handles.cancelbutt, 'enable', 'on');
    ismean=retr('ismean');
    maskiererx=retr('maskiererx');
    maskierery=retr('maskierery');
    for i=size(ismean,1):-1:1 %remove averaged results
        if ismean(i,1)==1
            filepath(i*2,:)=[];
            filename(i*2,:)=[];

            filepath(i*2-1,:)=[];
            filename(i*2-1,:)=[];
            if size(maskiererx,2)>=i*2
                maskiererx(:,i*2)=[];
                maskierery(:,i*2)=[];
                maskiererx(:,i*2-1)=[];
                maskierery(:,i*2-1)=[];
            end
        end
    end
    put('filepath',filepath);
    put('filename',filename);
    put('ismean',[]);
    sliderrange

    %for ensemble correltaion experiments
    %{
    setappdata(0,'cormap1',[]);
    setappdata(0,'cormap2',[]);
    setappdata(0,'cormap3',[]);
    setappdata(0,'cormap4',[]);
    %}

    for i=1:2:size(filepath,1)

```

```

if i==1
    tic
end
cancel=retr('cancel');
if isempty(cancel)==1 || cancel ~=1
    image1=imread(filepath{i});
    image2=imread(filepath{i+1});
    if size(image1,3)>1
        image1=uint8(mean(image1,3));
        image2=uint8(mean(image2,3));
        disp('Warning: To optimize speed, your images
should be grayscale, 8 bit!')
    end
    set(handles.progress, 'string' , ['Frame progress:
0%']);drawnow;
    clahe=get(handles.clahe_enable,'value');
    highp=get(handles.enable_highpass,'value');
    intenscap=get(handles.enable_intenscap, 'value');
    clahe_size=str2double(get(handles.clahe_size,
'string'));
    highp_size=str2double(get(handles.highp_size,
'string'));
    wienerwurst=get(handles.wienerwurst, 'value');
    wienerwurst_size=str2double(get(handles.wienerwurst_size,
'string'));

    Autolimit_Callback
    minintens=str2double(get(handles.minintens,
'string'));
    maxintens=str2double(get(handles.maxintens,
'string'));
    roirect=retr('roirect');
    image1 = PIVlab_preproc (image1,roirect,clahe,
clahe_size,highp,highp_size,intenscap,wienerwurst,wienerwurst_size,mi
nintens,maxintens);
    image2 = PIVlab_preproc (image2,roirect,clahe,
clahe_size,highp,highp_size,intenscap,wienerwurst,wienerwurst_size,mi
nintens,maxintens);
    maskiererx=retr('maskiererx');
    maskierery=retr('maskierery');
    ximask={};
    yimask={};
    if size(maskiererx,2)>=i
        for j=1:size(maskiererx,1);
            if isempty(maskiererx{j,i})==0
                ximask{j,1}=maskiererx{j,i};
                yimask{j,1}=maskierery{j,i};
            else
                break
            end
        end
        if size(ximask,1)>0
            mask=[ximask yimask];
        else
            mask=[];
        end
    else
        mask=[];
    end
end

```

```

end
interrogationarea=str2double(get(handles.intarea,
'string'));
step=str2double(get(handles.step, 'string'));
subpixfinder=get(handles.subpix, 'value');
if get(handles.dcc, 'Value')==1
    [x, y, u, v, typevector] = piv_DCC
(image1,image2,interrogationarea, step, subpixfinder, mask,
roirect);
elseif get(handles.fftmulti, 'Value')==1
    passes=1;
    if get(handles.checkbox26, 'value')==1
        passes=2;
    end
    if get(handles.checkbox27, 'value')==1
        passes=3;
    end
    if get(handles.checkbox28, 'value')==1
        passes=4;
    end
    int2=str2num(get(handles.edit50, 'string'));
    int3=str2num(get(handles.edit51, 'string'));
    int4=str2num(get(handles.edit52, 'string'));
    contents = get(handles.popupmenu16, 'string');

imdeform=contents{get(handles.popupmenu16, 'Value')};
repeat = get(handles.Repeated_box, 'value');
mask_auto = get(handles.mask_auto_box, 'value');
[x, y, u, v, typevector] = piv_FFTmulti
(image1,image2,interrogationarea, step, subpixfinder, mask,
roirect,passes,int2,int3,int4,imdeform,repeat,mask_auto);
    %u=real(u)
    %v=real(v)
end
resultslist{1, (i+1)/2}=x;
resultslist{2, (i+1)/2}=y;
resultslist{3, (i+1)/2}=u;
resultslist{4, (i+1)/2}=v;
resultslist{5, (i+1)/2}=typevector;
resultslist{6, (i+1)/2}=[];
put('resultslist', resultslist);
set(handles.fileselector, 'value', (i+1)/2);
set(handles.progress, 'string', ['Frame progress: '
100%'])
set(handles.overall, 'string', ['Total progress: '
int2str((i+1)/2/(size(filepath,1)/2)*100) '%'])
put('subtr_u', 0);
put('subtr_v', 0);
sliderdisp
% xpos=size(image1,2)/2-40;
% text(xpos,50, ['Analyzing... '
int2str((i+1)/2/(size(filepath,1)/2)*100) '%'], 'color',
'r', 'FontName', 'FixedWidth', 'fontweight', 'bold', 'fontsize', 20,
'tag', 'annoyingthing')
zeit=toc;
done=(i+1)/2;
tocome=(size(filepath,1)/2)-done;
zeit=zeit/done*tocome;
hrs=zeit/60^2;

```

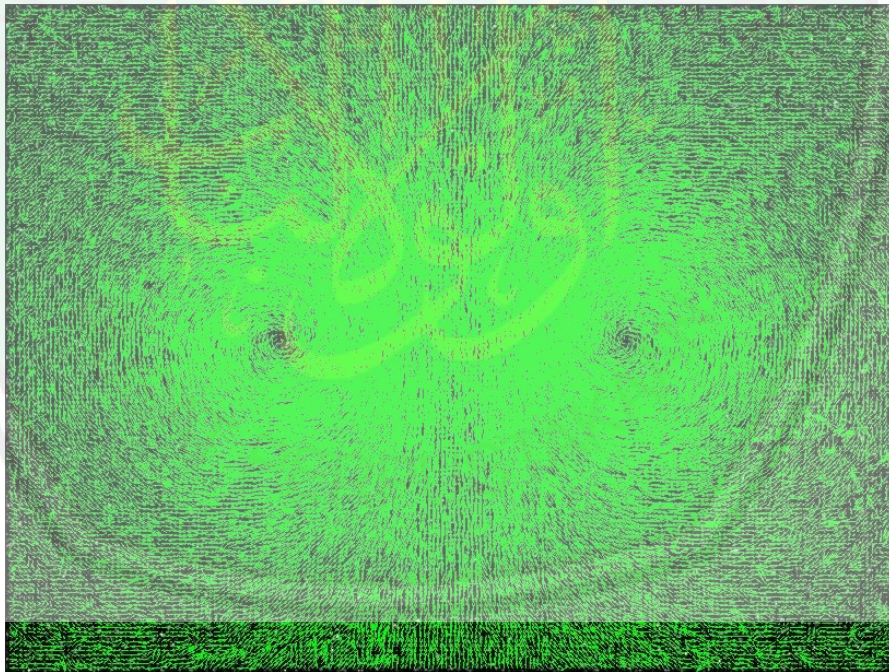
```

mins=(hrs-floor(hrs))*60;
secs=(mins-floor(mins))*60;
hrs=floor(hrs);
mins=floor(mins);
secs=floor(secs);
set(handles.totaltime,'string', ['Time left: '
sprintf('%2.2d', hrs) 'h ' sprintf('%2.2d', mins) 'm '
sprintf('%2.2d', secs) 's']);
end %cancel==0
end
delete(findobj('tag', 'annoyingthing'));
set(handles.overall, 'string', ['Total progress: '
int2str(100) '%'])
set(handles.totaltime, 'String', 'Time left: N/A');
if isempty(cancel)==1 || cancel ~=1
    try;sound(audioread('finished.mp3'),22000);catch;end
end
put('cancel',0);

end
toolsavailable(1);

```

Hasil analisis PIV diperoleh seperti Gambar 4.4 berikut.



Gambar 4.5 Analisis PIV

Dalam gambar analisis PIV terdapat tanda panah yang menunjukkan arah aliran yang sedang terjadi. Tanda anak panah yang mewakili arah vektor tersebut merupakan hasil pembacaan arah aliran yang sudah terjadi.

4.2 Hasil Uji Coba

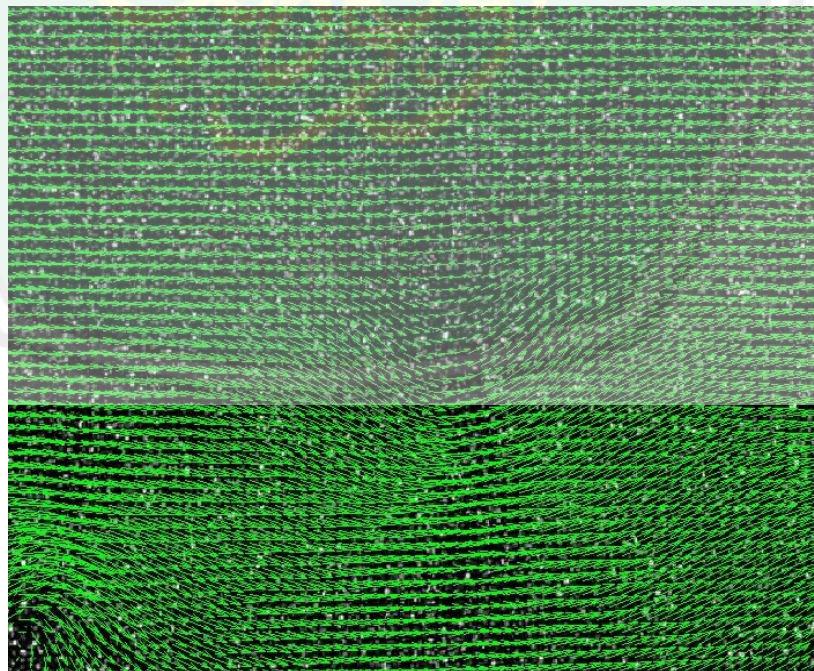
Berdasarkan langkah uji coba yang telah dijelaskan subbab sebelumnya, pada subbab ini akan dijelaskan lingkup uji coba.

4.2.1 Lingkup Uji Coba

Proses uji coba sistem dilakukan pada komputer spesifikasi intel inside dengan RAM DDR3 2 GB dan sistem operasi Windows 10. Sistem ini dibangun menggunakan bahasa pemrograman Matlab 2014R a. Dengan spesifikasi komputer tersebut dapat melakukan proses analisis PIV dengan perhitungan waktu yang kompleks. Spesifikasi komputer yang lebih bagus dapat mempercepat proses tersebut.

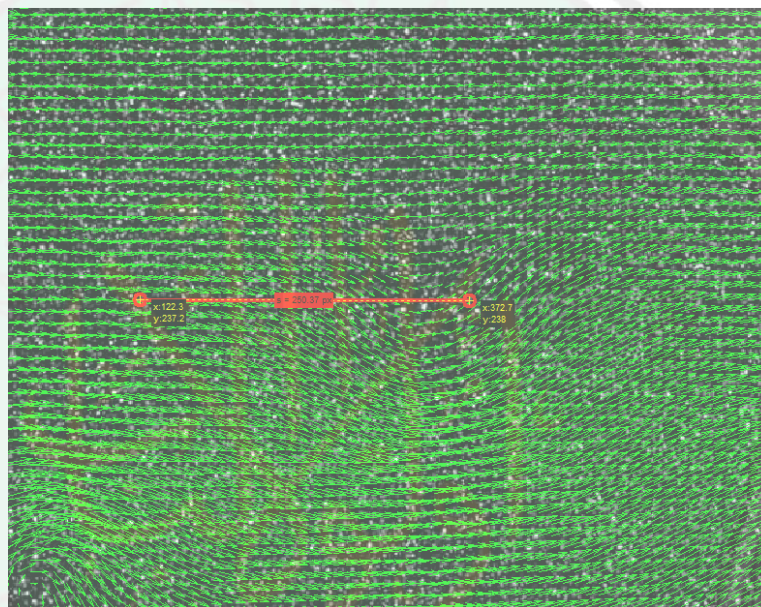
4.2.2 Hasil Percobaan pada Aliran Lurus

Percobaan yang dilakukan pada aliran dengan saluran yang lurus akan dianalisis tanpa menggunakan area pengecualian. Area interrogasi dalam saluran yang lurus memiliki vektor yang dapat dianalisis sebagai berikut :



Gambar 4.6 Analisi PIV dalam Saluran Lurus

Gambar 4.6 menunjukkan arah aliran yang bergerak dari satu arah. Pada aliran tersebut yang sudah melalui proses analisis seperti yang dilakukan pada subbab penjelasan langkah percobaan. Selanjutnya dilakukan kalibrasi pada citra untuk mengetahui keakurasian terhadap gambar nyata. *Calibration* tersebut dilakukan dengan perbandingan terhadap gambar yang belum dilakukan analisis atau dengan pembuatan jarak yang dibuat dengan parameter terhadap jarak nyata dengan satuan milimeter. Berikut merupakan *Calibration* pada saluran lurus :

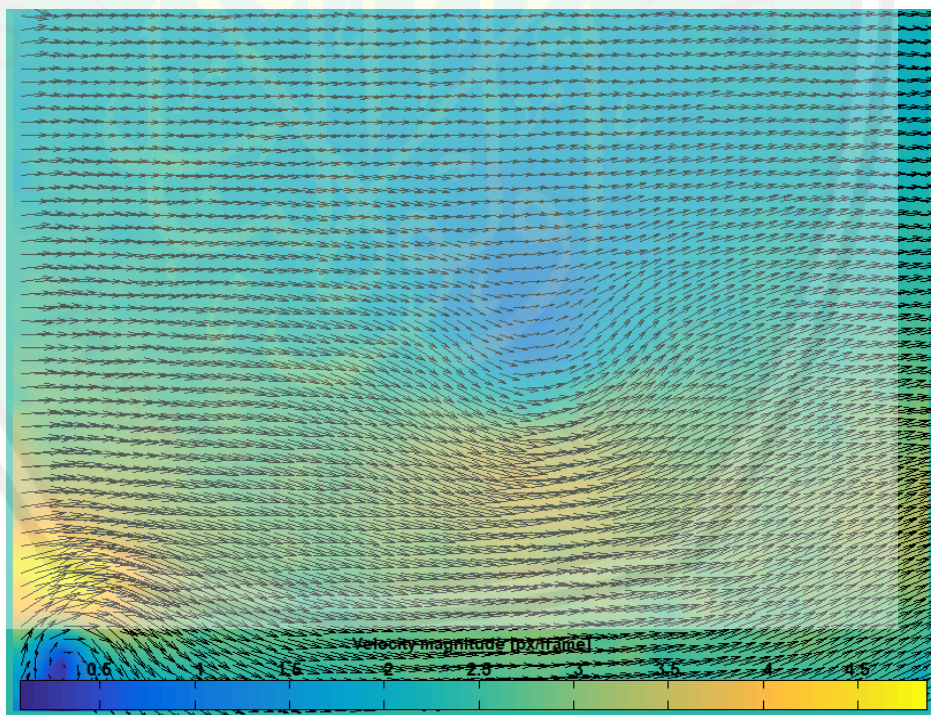


Gambar 4.7 *Calibration* pada Saluran Lurus

Select reference distance	
Real distance [mm]	1
time step [ms]	1
Clear calibration	
1 px = 1e-05 m	
1 px/frame = 0.00598 m/s	
Apply calibration	

Gambar 4.8 Perhitungan *Calibration*

Calibration pada Gambar 4.7 dilakukan dengan membuat jarak atau garis dengan panjang sesuai yang diinginkan untuk dilakukan pengujian akurasi. Seperti pada gambar terdapat garis merah yang melintang dari titik X pada 122.3 sampai dengan titik X diposisi 372.7 dan titik Y 237.2 sampai 236 maka didapatkan hasil kecepatan dalam satuan jarak nyata m/s px dengan $s = 250.37$ px. Sedangkan pada Gambar 4.8 merupakan nilai kecepatan dari jarak yang sudah dibuat. Bahwa kecepatan 1 px yang setara dengan 1 *milimeter* adalah $1e - 0.5$ meter, maka kecepatan dari jarak yang dibuat adalah 0.00598 m/s dari setiap 1 *px/frame*. Hasil tersebut akan dilakukan skala data dalam satuan *px/frame* untuk mengetahui kecepatan dalam histogramnya. Berikut merupakan hasil skala data dan juga validasi terhadap data dengan satuan *px/frame* :

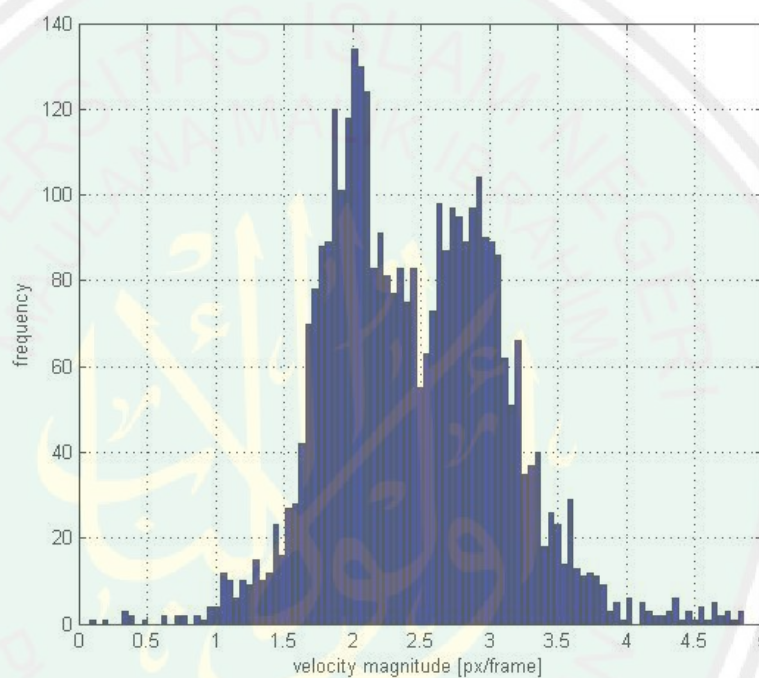


Gambar 4.9 Hasil Penghalusan dan Penskalaan Data Aliran Lurus

Hasil yang diperoleh seperti pada Gambar 4.8 tersebut merupakan hasil sirkulasi besarnya kecepatan pada *frame* yang ditampilkan dan dapat dibaca dengan

vector warna. Kondisi kecepatan pada aliran ditunjukkan dengan warna seperti warna kuning yang paling cerah memiliki besar kecepatan pada angka 4.5 *px/frame* dan ditandai dengan vektor aliran yang rapat menunjukkan bahwa kecepatan pada titik tersebut dalam *frame* yang ditunjukkan memiliki kecepatan tinggi.

Besarnya kecepatan aliran dalam setiap *frame* kemudian ditunjukkan dengan histogram seperti pada gambar berikut :



Gambar 4.10 Histogram Aliran Lurus

Pada Gambar 4.9 hasil histogram aliran lurus tersebut memberi informasi bahwa frekuensi tertinggi 130 samapai 140 terdapat pada 1 sampai 4 *px/frame* besarnya kecepatan aliran pada *frame* tersebut. Hal tersebut melihat pada hasil penghalusan data dan penskalaan yang ditunjukkan pada Gambar 4.8 yang mendominasi adalah warna biru dengan frekuensi paling tinggi dan besar kecepatan yang standar.

Berdasarkan hasil analisis pada *frame* maka dapat diperoleh perhitungan kecepatan aliran dengan mengetahui titik koordinat pada gambar. Perhitungan manual yang dilakukan pada aliran saluran lurus menghasilkan seperti pada Tabel 4.2 berikut.

Tabel 4.2 Hasil Perhitungan Kecepatan Manual pada Aliran Lurus

No.	Koordinat Titik (cm)				Jarak x (m)	Jarak y (m)	Perpindahan (m)	Kecepatan (m/detik)
	Gambar 1		Gambar 2					
	X	Y	X	Y				
	[1]	[2]	[3]	[4]				
					$[5]=([1]-[3])/100$	$[6]=([2]-[4])/100$	$[7]=\sqrt{[5]^2 + [6]^2}$	$[8]=[7]/t$
1	351.6	274.2	233	205.5	1.186	0.687	1.368	0.0342
2	478.5	248	350.8	205.5	1.277	0.434	1.308	0.0327
3	480.1	70.5	244.5	63.9	2.357	0.066	1.556	0.0389
4	434.3	405.2	269.8	370.8	1.695	0.344	1.427	0.035
Jumlah								0.1408
Rata-rata								0.0352
Standar Deviasi								0.04032

Pada Tabel 4.2 tersebut menunjukkan rata-rata kecepatan yang didapat adalah 0.1408 dengan nilai standar deviasi 0.04032. hasil perhitungan tersebut menyatakan bahwa kecepatan yang terjadi merupakan kecepatan yang standar. Sedangkan percobaan perhitungan kecepatan aliran lurus pada sistem memiliki hasil yang ditunjukkan pada Tabel 4.3 berikut.

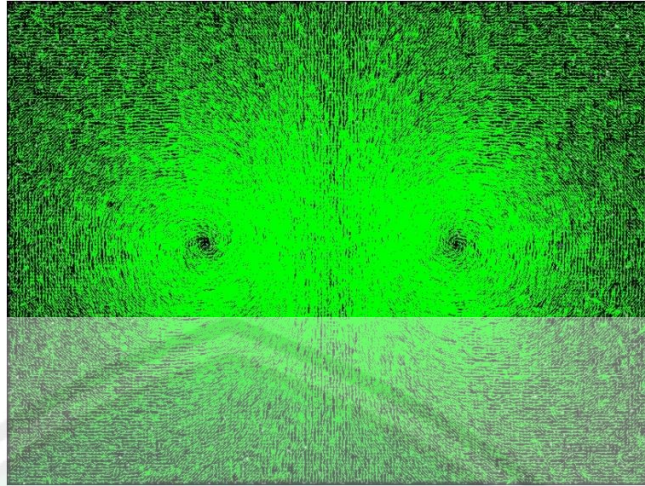
Tabel 4.3 Hasil Perhitungan Kecepatan Aliran Lurus pada Sistem

No.	Koordinat Titik (cm)				S (px)	Kecepatan (m/s)
	Gambar 1		Gambar 2			
	X	Y	X	Y		
	[1]	[2]		[4]		
1	351.6	274.2	233	205.5	137.13	0.00182
2	478.5	248	350.8	205.5	134.83	0.00278
3	480.1	70.5	244.5	63.9	235.77	0.00159
4	434.3	405.2	269.8	370.8	168.04	0.00223
Jumlah						0.00842
Rata-rata						0.002105
Standar Deviasi						0.00257

Perhitungan kecepatan yang dilakukan pada sistem memiliki asal nilai dengan satuan px/frame yang dikalibrasikan dengan satuan jarak nyata yaitu milimeter. Pada Tabel 4.3 tersebut menunjukkan bahwa rata-rata yang diperoleh yaitu 1 px/frame = 0.00215 dengan standar deviasi 0.00257.

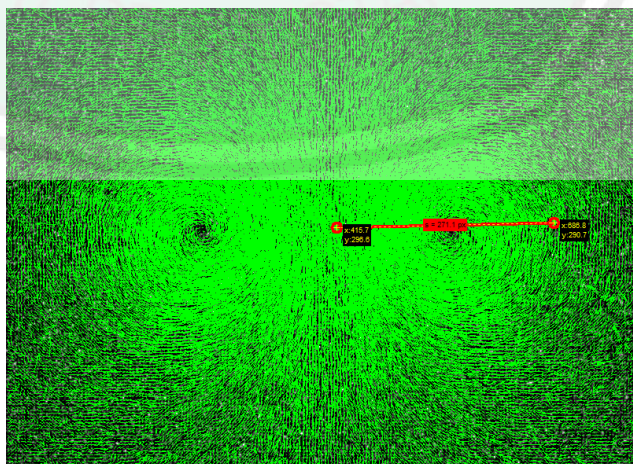
4.2.3 Hasil Percobaan pada Aliran Vortex

Percobaan yang dilakukan pada aliran vortex akan dianalisis tanpa menggunakan area pengecualian. Area interogasi dalam saluran yang lurus memiliki vektor yang dapat dianalisis sebagai berikut :



Gambar 4.11 Analisis PIV dalam Aliran Vortex

Berdasarkan Gambar 4.11 hasil analisis *transformasi fourier* dan analisis kecepatan aliran yang melalui proses seperti aliran di saluran lurus. Kemudian gambar dilakukan validasi atau *Calibration* yang bertujuan untuk mendapatkan faktor skala perbandingan antara satuan milimeter pada model real terhadap satuan *pixel* gambar yang diimpor sebagai data input. Pada *Calibration* dilakukan dengan membuat garis sebagai input perhitungan jarak nyata. Sehingga didapatkan skala faktor milimeter terhadap *pixel*. Hasil *Calibration* yang menunjukkan nilai kecepatan dengan jarak nyata dan jarak dalam sistem merupakan pengujian dalam sistem.

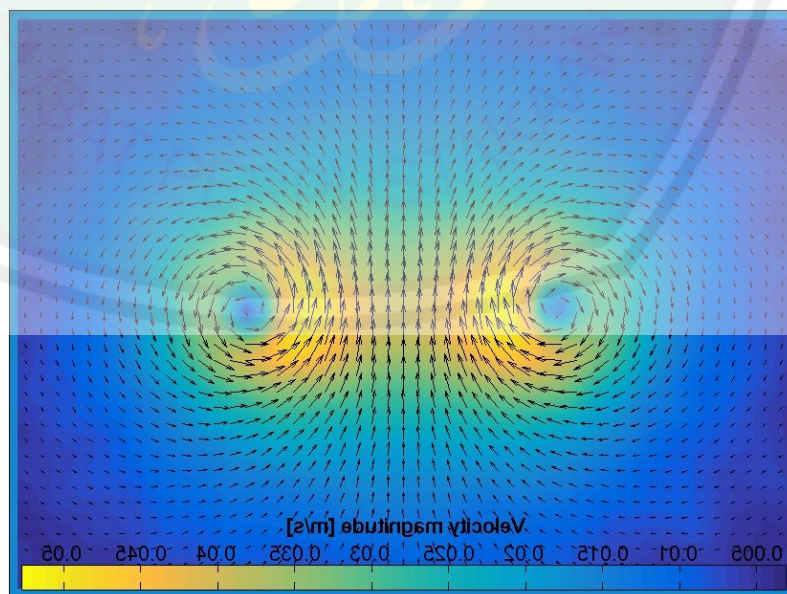


Gambar 4.12 Hasil *Calibration* terhadap Jarak Nyata

Calibration pada Gambar 4.12 dilakukan dengan membuat jarak atau garis dengan panjang sesuai yang diinginkan untuk dilakukan pengujian akurasi. Seperti pada gambar terdapat garis dari titik X pada 415.7 sampai dengan titik X diposisi 606.8, maka didapatkan hasil kecepatan dalam satuan jarak nyata m/s.

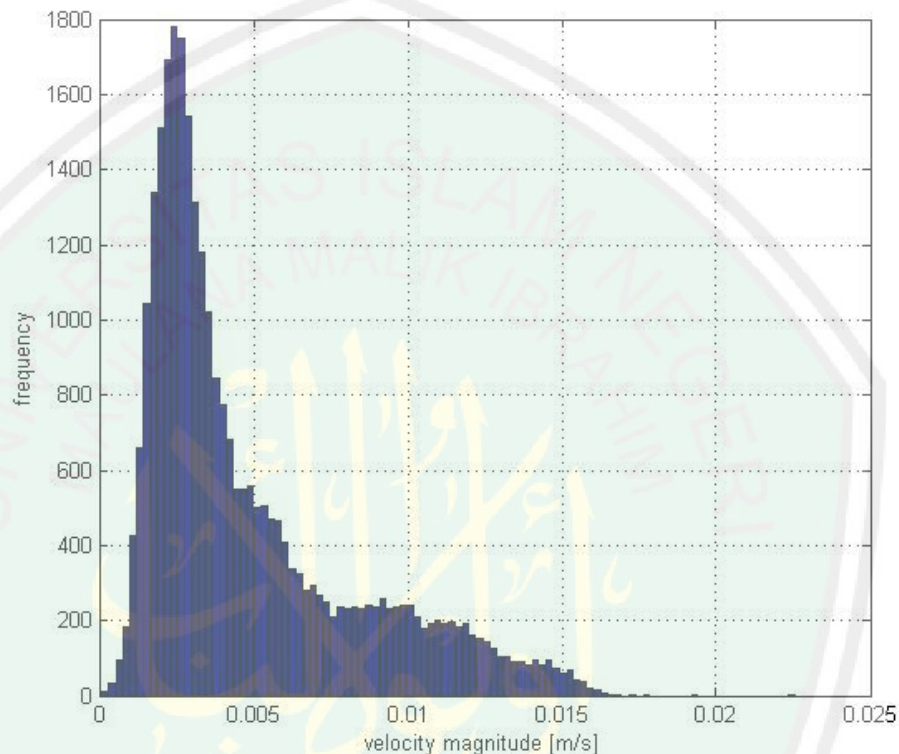
Selanjutnya, dapat dilakukan validasi data untuk mengetahui beberapa vektor yang salah. Vektor yang salah akan muncul karena daerah yang mendapatkan penerangan yang buruk pada gambar. Beberapa cara untuk memfilter data yaitu dapat dari penetapan batas kecepatan. Selain itu pemfilteran data dapat dilakukan dengan menentukan deviasi standar. Vektor yang diinterpolasi akan berwarna oren. Hal ini merupakan langkah opsional dalam sistem PIV.

Sirkulasi menggambarkan gerakan yang berasal dari aliran dalam sistem dengan menghaluskan data. Dalam sirkulasi tersebut dapat mengubah kerangka referensi yang dilakukan dengan mengurangi kecepatan aliran bebas dalam semua vektor. Kemudian dapat dilakukan perhitungan kecepatan rata-rata dari beberapa frame. Berikut merupakan hasil vortisitas atau penskalaan data.



Gambar 4.13 Hasil penghalusan dan Penskalaan Data Aliran Vortex

Hasil kecepatan aliran dapat dinyatakan dalam histogram yang menunjukkan frekuensi setiap besarnya kecepatan. Frekuensi tersebut merupakan jumlah besarnya kecepatan dalam setiap frame. Hasil kecepatan aliran ditunjukkan seperti pada Gambar 4.14 berikut.



Gambar 4.14 Histogram Kecepatan Aliran Vortex

Pada Gambar 4.14 merupakan histogram dari hasil perhitungan kecepatan aliran yang ditunjukkan nilai frekuensi dalam setiap besarnya kecepatan. Dalam setiap *frame* yang dihasilkan oleh gambar yang berpasangan akan menunjukkan frekuensi kecepatannya. Besar kecepatan dihasilkan dengan satuan m/s, seperti pada *Frame 1* besar kecepatan 0.03 m/s mempunyai frekuensi sebesar 1800, begitu juga dengan *frame* berikutnya.

Berdasarkan hasil analisis pada *frame* maka dapat diperoleh perhitungan kecepatan aliran dengan mengetahui titik koordinat pada gambar. Perhitungan

manual yang dilakukan pada aliran saluran lurus menghasilkan seperti pada Tabel 4.4 berikut.

Tabel 4.4 Hasil Perhitungan Kecepatan Manual pada Aliran Vortex

No.	Koordinat Titik (cm)				Jarak x (m)	Jarak y (m)	Perpindahan (m)	Kecepatan (m/detik)
	Gambar 1		Gambar 2					
	X	Y	X	Y				
	[1]	[2]	[3]	[4]				
					$[5]=([1]-[3])/100$	$[6]=([2]-[4])/100$	$[7]=\sqrt{[5]^2 + [6]^2}$	$[8]=[7]/t$
1	304.6	282.3	121.6	281.3	1.83	0.01	1.356	0.0339
2	248.7	276.4	114.8	236.1	1.33	0.403	1.3199	0.0329
3	663.6	239	517.1	194.8	1.464	0.442	1.380	0.0345
4	670.5	390.5	496.4	325.6	1.741	0.649	1.5459	0.0386
Jumlah								0.1399
Rata-rata								0.0349
Standar Deviasi								0.04011

Pada Tabel 4.4 tersebut menunjukkan rata-rata kecepatan pada aliran vortex yang didapat adalah 0.0349 dengan nilai standar deviasi 0.04011. Hasil perhitungan tersebut menyatakan bahwa nilai kecepatan tertinggi terjadi titik koordinat pada arus vortex. Sedangkan percobaan perhitungan kecepatan aliran vortex pada sistem memiliki hasil yang ditunjukkan pada Tabel 4.5 berikut.

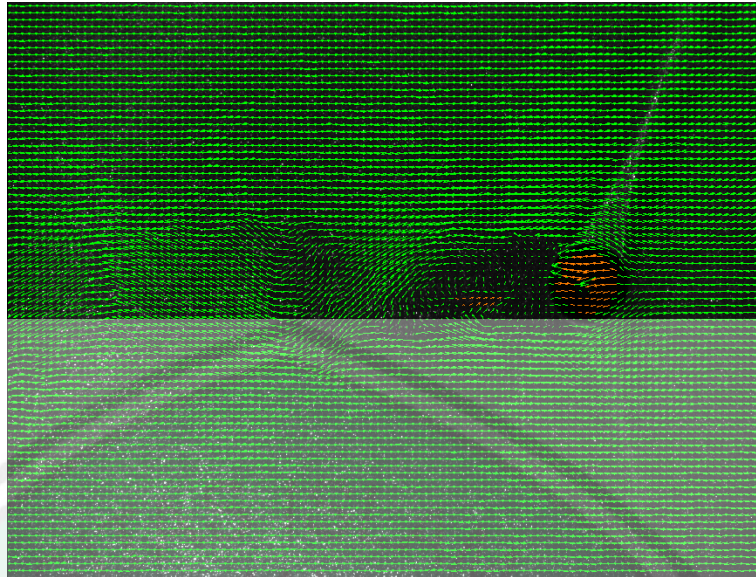
Tabel 4.5 Hasil Perhitungan Kecepatan Aliran Vortex pada Sistem

No.	Koordinat Titik (cm)				S (px)	Kecepatan (m/s)
	Gambar 1		Gambar 2			
	X	Y	X	Y		
	[1]	[2]		[4]		
1	304.6	282.3	121.6	281.3	182.95	0.00205
2	248.7	276.4	114.8	236.1	188.1	0.00199
3	663.6	239	517.1	194.8	153.1	0.00245
4	670.5	390.5	496.4	325.6	185.81	0.00202
Jumlah						0.00851
Rata-rata						0.00212
Standar Deviasi						0.00259

Perhitungan kecepatan yang dilakukan pada sistem memiliki asal nilai dengan satuan px/frame yang dikalibrasikan dengan satuan jarak nyata yaitu milimeter. Pada Tabel 4.5 tersebut menunjukkan bahwa rata-rata yang diperoleh yaitu 1 px/frame = 0.00212 dengan standar deviasi 0.00259.

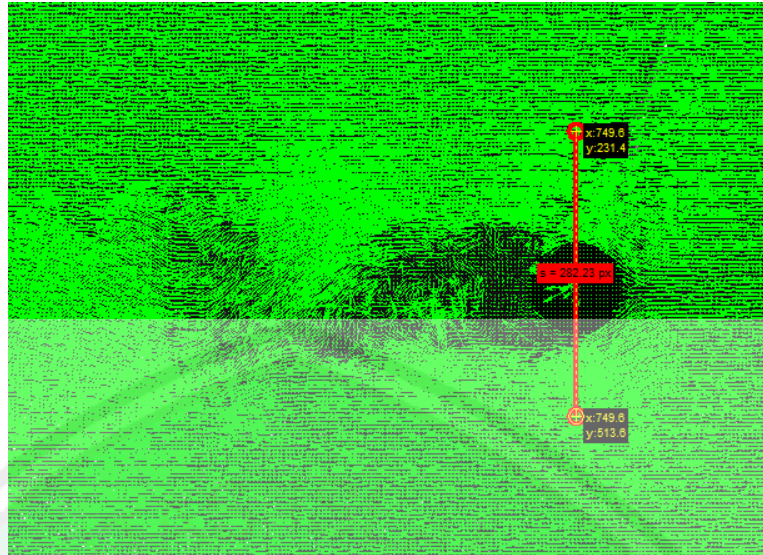
4.2.4 Hasil Percobaan pada Aliran di Saluran dengan Pilar

Percobaan yang dilakukan pada aliran pilar akan dianalisis sesuai dengan pilar yang menjadi pengaruh kecepatan aliran. Area interogasi dalam saluran yang memiliki pilar memiliki pengecualian pada objek pilar tersebut, maka vector aliran yang dapat dianalisis adalah sebagai berikut :

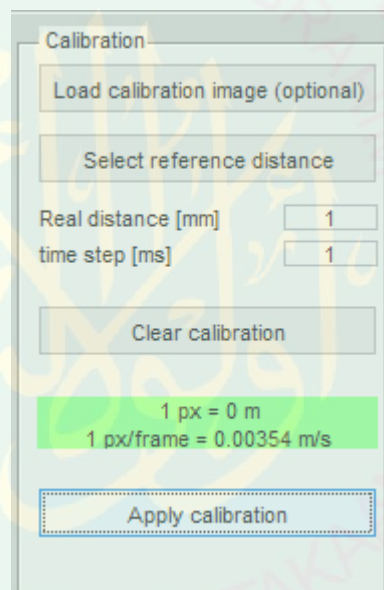


Gambar 4.15 Analisis PIV Aliran dengan Pengaruh Pilar

Gambar 4.15 menunjukkan arah aliran yang bergerak dari satu arah dengan pengaruh pilar. Pada aliran tersebut yang sudah melalui proses analisis seperti yang dilakukan pada subbab penjelasan langkah percobaan analisis PIV. Vektor yang didapatkan terdapat vektor dengan warna merah, hal tersebut merupakan vektor yang menyimpang dari arah aliran karena pengaruh pilar, sehingga tidak mengikuti perhitungan kecepatan. Selanjutnya dilakukan kalibrasi pada citra untuk mengetahui keakurasian terhadap gambar nyata. *Calibration* tersebut dilakukan dengan perbandingan terhadap gambar yang belum dilakukan analisis atau dengan pembuatan jarak yang dibuat dengan parameter terhadap jarak nyata dengan satuan milimeter. Berikut merupakan *Calibration* pada aliran yang dipengaruhi pilar yang ditunjukkan pada Gambar 4.16 dengan posisi titik X 749.6 sampai 749.6 dan titik Y 231.4 sampai 513.6 maka diperoleh waktu tempuh $s = 282.23$ px yang akan diimplementasikan pada jarak nyata m/s:

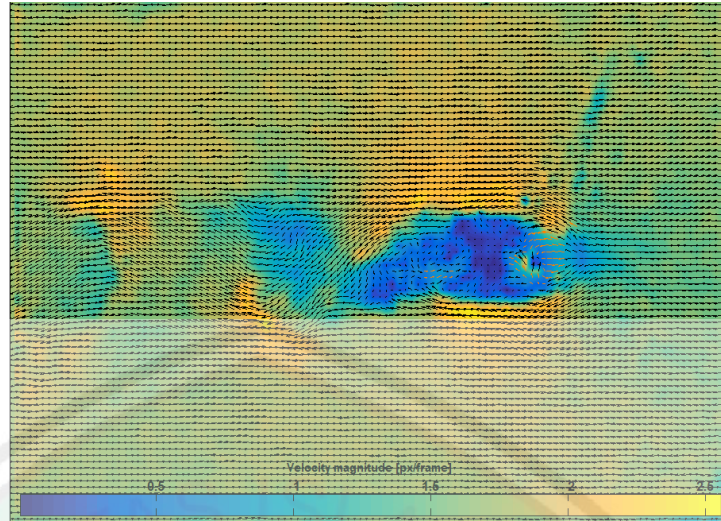


Gambar 4.16 *Calibration* Aliran dengan Pengaruh Pilar



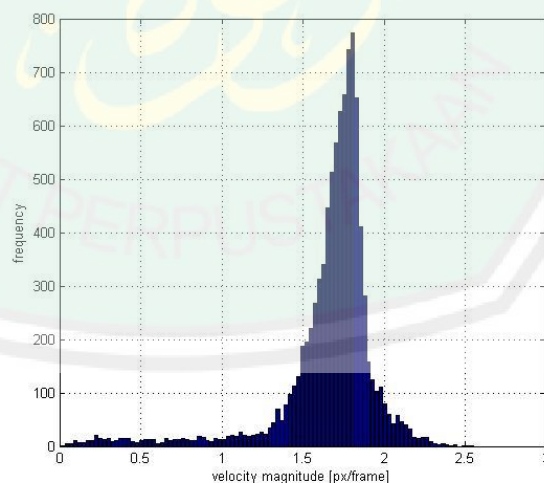
Gambar 4.17 Perhitungan *Calibration* Aliran dengan Pengaruh Pilar

Gambar 4.17 merupakan nilai kecepatan dari jarak yang sudah dibuat. Bahwa kecepatan 1 px yang setara dengan 1 *milimeter* adalah 0 meter, maka kecepatan dari jarak yang dibuat adalah 0.005354 m/s dari setiap 1 *px/frame*. Hasil tersebut akan dilakukan skala data dalam satuan *px/frame* untuk mengetahui kecepatan dalam histogramnya. Berikut merupakan hasil skala data dan juga validasi terhadap data dengan satuan *px/frame* :



Gambar 4.18 Hasil Penghalusan dan Penskalaan Data Aliran dengan Pengaruh Pilar

Pada Gambar 4.18 merupakan skala data kecepatan yang dilakukan seperti pada aliran yang lainnya. Pilar yang terdapat pada aliran tersebut ditandai dengan warna biru, bahwa alirang yang terjadi di sekitar pilar memiliki besar kecepatan yang rendah. Selanjutnya, hasil dari skala data tersebut akan mendapatkan histogram kecepatan dengan domain frekuensi setiap framenya.



Gambar 4.19 Histogram Kecepatan Aliran dengan Pengaruh Pilar

pada Gambar 4.19 merupakan histogram dari hasil skala data yang ditunjukkan dengan frekuensi setiap besarnya kecepatan.

Berdasarkan hasil analisis pada *frame* maka dapat diperoleh perhitungan kecepatan aliran dengan mengetahui titik koordinat pada gambar. Perhitungan manual yang dilakukan pada aliran saluran lurus menghasilkan seperti pada Tabel 4.6 berikut.

Tabel 4.6 Hasil Perhitungan Kecepatan Manual pada Aliran dengan Pilar

No.	Koordinat Titik (cm)				Jarak x (m)	Jarak y (m)	Perpindahan (m)	Kecepatan (m/detik)
	Gambar 1		Gambar 2					
	X	Y	X	Y				
	[1]	[2]	[3]	[4]				
					$[5]=([1]-[3])/100$	$[6]=([2]-[4])/100$	$[7]=\sqrt{[5]^2 + [6]^2}$	$[8]=[7]/t$
1	727.6	344.8	449.3	297.1	2.283	0.477	1.661	0.0415
2	806.6	480.2	510.6	462.6	2.96	0.176	1.77	0.0442
3	500.6	417.5	212.1	397.4	2.885	0.201	1.756	0.0439
4	990.9	354.8	753.9	300.9	2.37	0.539	1.7055	0.0426
Jumlah								0.1722
Rata-rata								0.04305
Standar Deviasi								0.04751

Pada Tabel 4.6 tersebut menunjukkan rata-rata kecepatan pada aliran dengan pengaruh pilar yang didapat adalah 0.04305 dengan nilai standar deviasi 0.04751. Hasil perhitungan tersebut menyatakan bahwa nilai kecepatan tertinggi terjadi titik koordinat pada daerah sekitar pilar. Sedangkan percobaan perhitungan kecepatan aliran dengan pengaruh pilar pada sistem memiliki hasil yang ditunjukkan pada Tabel 4.7 berikut.

Tabel 4.7 Hasil Perhitungan Kecepatan Aliran dengan Pilar pada Sistem

No.	Koordinat Titik (cm)				S (px)	Kecepatan (m/s)
	Gambar 1		Gambar 2			
	X	Y	X	Y		
	[1]	[2]		[4]		
1	727.6	344.8	449.3	297.1	233.17	0.00161
2	806.6	480.2	510.6	462.6	296.44	0.00126
3	500.6	417.5	212.1	397.4	289.14	0.0013
4	990.9	354.8	753.9	300.9	243..08	0.00154
Jumlah						0.00571
Rata-rata						0.00142
Standar Deviasi						0.00896

Perhitungan kecepatan yang dilakukan pada sistem memiliki asal nilai dengan satuan px/frame yang dikalibrasikan dengan satuan jarak nyata yaitu milimeter. Pada Tabel 4.7 tersebut menunjukkan bahwa rata-rata yang diperoleh yaitu 1 px/frame = 0.00142 dengan standar deviasi 0.00896.

4.3 Pembahasan

Aliran air sungai mempunyai bentuk berbelok-belok, mempunyai arah ke kanan, arah ke kiri, dengan keadaan yang berubah-ubah menciut dan melebar, serta ada yang berarus deras dan ada yang berarus tenang. Dalam Al Quran Surat An Nahl ayat 15 disebutkan :

وَأَنْهَارًا وَسُبُلًا لَّعَلَّكُمْ تَهْتَدُونَ (١٥)

18. (dan Dia menciptakan) sungai-sungai dan jalan-jalan agar kalian mendapat petunjuk.

Dalam Tafsir Ibn Katsir dijelaskan, bahwa Allah menciptakan sungai-sungai di bumi yang mengalir dari suatu tempat ke tempat yang lain sebagai rezeki untuk umat manusia. Sungai yang berhulu dari suatu tempat dan menjadi rezeki bagi orang-orang yang ada pada tempat lain yang dilalui oleh sungai. aliran sungai menempuh berbagai kawasan dan daerah melalui hutan-hutan, padang-padang, dan membelah bukit serta lembah-lembah. Maka sampai pada suatu negri yang penduduknya mendapatkan manfaat besar daripada aliran sungai.

Berdasarkan penjelasan ayat tersebut maka dilakukan uji coba dengan 3 bentuk aliran yang telah dijelaskan pada subbab-subbab sebelumnya. dalam uji coba tersebut mendapatkan hasil yang diketahui bahwa dengan penggunaan algoritma FFT dapat meningkatkan hasil kualitas citra yang mampu memberikan informasi data dengan lebih cepat dan efisien. Perhitungan kecepatan dapat dilakukan dengan menghitung korelasi untuk mengukur jarak perpindahan titik partikel. Dalam Al Quran surat Ar Ra'd ayat 17.

أَنْزَلَ مِنَ السَّمَاءِ مَاءً فَسَالَتْ أَوْدِيَةٌ بِقَدَرِهَا فَاحْتَمَلَ السَّيْلُ زَبَدًا رَابِيًا ص (١٧)

17. Allah telah menurunkan air (hujan) dari langit, maka mengalirlah air di lembah-lembah menurut ukurannya, maka arus itu membawa buih yang mengambang

Pada ayat di atas, disebutkan bahwa aliran yang mengalir pada masing-masing lembah yaitu sesuai dengan ukuran luasnya. Aliran mengalir membawa buih-buih yang mengambang dengan mengikuti arah aliran. Hal ini menjadi

perintah terhadap umat islam agar lebih kritis dalam memperhatikan dan membaca kondisi lingkungannya.

Dalam Tafsir Ibnu Katsir dijelaskan, bahwa masing-masing lembah dipenuhi oleh air hujan sesuai dengan ukuran luasnya, lembah yang luas memuat banyak air dan embah yang keci memuat air sesuai dengan ukurannya. Dimana pada air yang mengair di permukaan lembah tersebut terdapat buih-buih yang mengikuti arus. Hal ini juga mengisyaratkan dan menggambarkan tentang hati manusia dan perbedaannya. Di antaranya ada yang dapat memuat ilmu yang banyak, di antaranya ada pula yang tidak dapat memuat ilmu yang banyak, meainkan sedikit karena hatinya sempit. Oleh karena itu dengan perumpamaan tersebut, umat manusia diperintahkan dengan diberi petunjuk oleh Allah SWT untuk menggunakan ilmunya untuk lebih memperhatikan lingkungan sekitarnya.

Dijelaskan dalam Tafsir Jalalain, bahwa nikmat dan karunia Allah kepada umat manusia sungguh sangat jelas dan nyata. Hanya Allah SWT yang menurunkan hujan dari awan, sehingga mampu membuat sungai dan lembah dapat mengalirkan air. Semua itu sesuai dengan ketentuan takdir yang telah ditetapkan Allah SWT untuk dapat menumbuhkan tumbuhan-tumbuhan dan menumbuhkan pohon. Sungai-sungai ketika mengalirkan air, membawa benda-benda yang mengapung di atas permukaanya dan mengalir mengikuti arah air. Sedangkan di dalamnya terdapat benda-benda yang dapat dimanfaatkan dan tidak lenyap. Demikian halnya dengan benda yang dapat dimanfaatkan, hal ini sebagai petunjuk dan ilmu untuk manusia sehingga bisa memanfaatkan ilmu yang sudah dijelaskan.

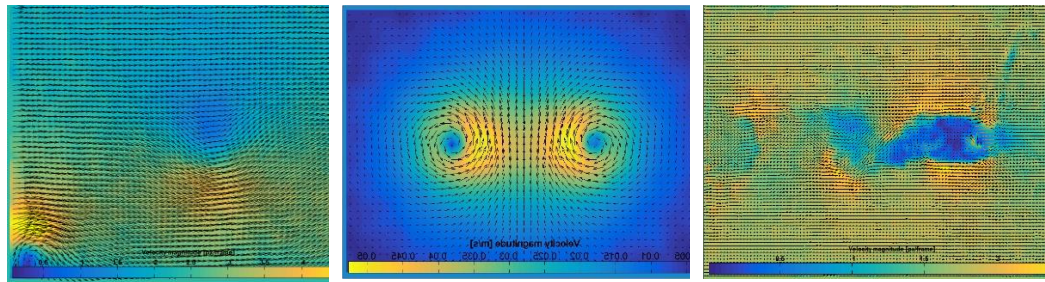
Manusia diperintahkan memeriksa suatu informasi dengan teliti agar terhindar dari musibah yang bisa saja terjadi. Sesuai dengan penelitian ini,

dilakukan perhitungan kecepatan aliran dengan proses pengolahan citra yang menghitung perpindahan buih-buih yang mengalir dalam aliran untuk mengetahui tingkat kecepatan aliran didalamnya. Metode ini dilakukan agar mendapatkan informasi yang akurat tanpa mengganggu aliran dan memanfaatkan buih yang mengikuti arus aliran untuk mendapatkan arah aliran seperti yang disebutkan dalam ayat Al Quran di atas.

Dalam sistem PIV (*Particle Image Velocimetry*) yang menggunakan teknik foto untuk pengambilan dan pemrosesan data maka proses akurasi data yaitu dilakukan pada bagian *Calibration* untuk mengetahui nilai jarak dalam visual dan jarak dalam nyata adalah sebanding. Selanjutnya, untuk mengetahui lebih jelas keakuratan data yang diperoleh, maka digunakan nilai RMSE. Penggunaan nilai RMSE yaitu untuk memberikan hasil, jika presentase nilai error dari metode algoritma FFT dalam sistem PIV cukup rendah. Maka nilai ini menunjukkan bahwa sistem PIV mampu memberikan data kecepatan aliran yang akurat.

Metode PIV (*Particle Image Velocimetry*) dengan pendekatan algoritma FFT ini memiliki keunggulan dalam keakurasian dan kecepatan waktu perhitungan. Sehingga sistem PIV ini mampu memberikan hasil keputusan nilai kecepatan aliran dengan cepat dan mudah digunakan. Hal ini dikarenakan algoritma FFT yang mampu memberikan informasi secara keseluruhan dengan peningkatan intensitas gambar dan kompleksitas waktu dari DFT secara umum dengan teknik konjugasi.

Percobaan yang dilakukan pada 3 bentuk aliran ini memberi hasil yang bisa disimpulkan dari skala dan histogram tiap data aliran.



a) Aliran Lurus

b) Aliran Vortex

c) Aliran dengan Pilar

Gambar 4.20 Hasil Skala Data dalam 3 Bentuk Aliran.



a) Aliran Lurus

b) Aliran Vortex

c) Aliran Pilar

Gambar 4.21 Hasil Histogram Kecepatan dalam 3 Bentuk Aliran

Gambar 4.20 dan Gambar 4.21 merupakan hasil perhitungan kecepatan aliran yang berbeda kondisi dengan pengaruh masing-masing. Pada aliran lurus skala data dan histogram menunjukkan bahwa antara warna dalam skala dan frekuensi kecepatan yang ditunjukkan dalam histogram menunjukkan hasil analisis dan perhitungan kecepatan adalah sama. Parameter yang mempengaruhi kecepatan aliran dalam data citra digital yaitu jarak perpindahan partikel dan objek yang terdapat pada aliran. Pada aliran di saluran lurus citra yang dihasilkan adalah tekanan aliran pada beberapa titik seperti pada Gambar 4.20 bagian a) Aliran lurus, besar kecepatan aliran yang tinggi ditunjukkan pada warna kuning dengan vektor yang lebih rapat dan ditunjukkan dengan posisi yang bergelombang. Pada aliran vortex dan aliran dengan pengaruh pilar juga memiliki data yang ditampilkan sama dengan aliran di saluran lurus. Pada aliran vortex kecepatan tertinggi terdapat pada

saluran vortex yang memiliki arus tinggi yang ditunjukkan pada 2 bentuk arus tengah berwarna kuning. Sedangkan pada aliran yang dipengaruhi pilar menunjukkan bahwa daerah sekitar pilar memiliki kecepatan yang standar dan kecepatan tinggi pada daerah yang memiliki jarak lebih jauh dari titik koordinat pilar.

Penguji keakurasian sistem data kecepatan selain dilakukan pada proses *Calibration* juga dapat dilakukan dengan perhitungan nilai RMSE (*Root, Mean, Square, Error*) untuk mengetahui tingkat error terhadap sistem. Sehingga hasil dapat digunakan sebagai kesimpulan dalam kelayakan pemakaian sistem. Setiap percobaan dilakukan perhitungan nilai RMSE untuk mengetahui hasil analisis pengukuran. Perhitungan nilai RMSE didapatkan dari hasil perhitungan manual dan perhitungan sistem yang dijelaskan pada setiap hasil percobaan.

Penguji keakurasian sistem pada percobaan aliran disaluran lurus menghasilkan perhitungan sebagai berikut :

$$\begin{aligned} \text{RMSE} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^4 0.1408 - 0.0842^2}{4}} \\ &= 0.13372\% \end{aligned}$$

Perhitungan keakurasian sistem pada percobaan aliran vortex dilakukan seperti berikut:

$$\begin{aligned} \text{RMSE} &= \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^4 0.1399 - 0.0851^2}{4}} \\ &= 0.13266\%. \end{aligned}$$

Sedangkan keakurasian sistem pada aliran yang memiliki pengaruh pilar yaitu sebagai berikut :

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^4 0.1722 - 0.0571^2}{4}}$$

$$= 0.16894\%$$

Maka dari perhitungan-perhitungan tersebut, percobaan pada 3 bentuk aliran menghasilkan nilai RMSE 0.13372% pada aliran di saluran lurus, 0.13266 % pada aliran vortex dan 0.16894% pada aliran dengan pengaruh pilar. Dalam preferensi penilaian menggunakan RMSE memiliki hasil mendekati nol adalah yang terbaik. Sedangkan hasil yang didapatkan mendekati nilai 0, maka dari nilai performa RMSE sistem memiliki keakuratan data.



BAB V

PENUTUP

Pada bab ini akan dijelaskan mengenai penarikan kesimpulan berdasarkan hasil yang diperoleh dari penelitian ini dan saran terhadap penelitian yang telah dilakukan untuk pengembangan penelitian ini.

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil uji coba penelitian dan pembahasan mengenai pengukuran kecepatan aliran terbuka menggunakan metode *Particle Image Velocimetry* dan pendekatan algoritma *Discrete Fourier Transformation* dan dilakukan kompleksitas menggunakan algoritma *Fast Fourier Transformation*, dapat ditarik kesimpulan bahwa pengukuran kecepatan aliran pada 3 bentuk aliran yaitu, aliran di saluran lurus, aliran vortex dan aliran dengan pengaruh pilar. Pada aliran di saluran lurus perhitungan dilakukan dalam waktu 00.00.21 yang mampu menganalisis arah vektor kecepatan aliran dalam 4 frame. 4 frame tersebut merupakan gambar yang berpasangan yang diambil dalam waktu beruntun atau berurutan. Gambar yang dianalisis memiliki resolusi yang tinggi yaitu 640 x 480 pixel, semakin besar resolusi gambar maka semakin akurat analisis gerak partikel dalam gambar yang menjadi titik koordinat. Tiap data titik gambar mengandung informasi lokasi titik dan data intensitas kecerahan. Karena metode *Particle Image Velocimetry* mengukur kecepatan partikel atau gerak partikel, maka dilakukan operasi berbasis frame tersebut. Operasi ini dilakukan dengan melakukan pengurangan nilai titik pada gambar 1 dengan gambar yang lain.

Dalam perhitungan kecepatan aliran yang dilakukan pada sistem ini menghasilkan data dalam histogram untuk membaca pola besarnya kecepatan yang

telah diperoleh. Besar kecepatan dinyatakan dalam satuan m/s dan ditampilkan dalam bentuk frekuensi. Hasil perhitungan dengan metode PIV dan pendekatan algoritma DFT dan FFT tersebut dilakukan proses pengujian sistem untuk mengetahui nilai keakuratan sistem. Perhitungan akurasi tiap-tiap aliran menghasilkan nilai RMSE 0.13372% pada aliran di saluran lurus, 0.13266 % pada aliran vortex dan 0.16894%. Dalam preferensi penilaian menggunakan RSME memiliki hasil mendekati nol adalah yang terbaik. Sedangkan hasil yang didapatkan mendekati 0, maka dari nilai performa RMSE sistem memiliki keakuratan data.

5.2 Saran

Setelah dilakukan berbagai kegiatan dalam penelitian ini, terdapat beberapa saran yang mungkin berguna untuk dapat mengembangkan penelitian ini. Berikut merupakan saran-saran tersebut :

1. Menggunakan beberapa metode untuk mengetahui kecepatan aliran selain PIV (*Particle Image Velocimetry*).
2. Menggunakan metode yang lain untuk dilakukan perbandingan.
3. Data yang digunakan bukan hanya aliran air saja, tetapi aliran fluida, ahar, atau objek aliran-aliran yang lain.
4. Membuat pengembangan media sistem berbasis mobile pada saat perhitungan kecepatan agar bisa dilakukan lebih praktis.

DAFTAR PUSTAKA

- Al-Mahally, Imam Jalaluddin dan Imam Jalaluddin As-suyuti. (1990). *Tafsir Jalalain dan Asbabun nuzulnya*, Jilid 1. Bandung : Sinar Baru.
- Cow, V. T. (1992). *Hidraulika Saluran Terbuka*. Jakarta: Erlangga.
- Jain, A. K. (1989). *Fundamentals of Digital Image Processing*. USA: Prentice Hall.
- Katsir, Ibnu. Tafsir A Quran Ar Ra'd Ayat 17. <http://www.ibnukatsironline.com/>. Diakses 28 September 2019
- Markus Raffel, C. E. (2007). *Particle Image Velocimetry*. Verlag Berlin Heidelberg: Springer.
- Mokobombang S. R., H. P. (2013). Analisa Vekto Kecepatan dan Pola Aliran di Sekitar Pilar dengan Metode PIV (Particle Image Velocimetry). *Jurnal Teknik Sipil*, 1-9.
- Mulyandari, R. (2010). *Kajian Gerusan Lokal pada Ambang Dasar Akibat Variasi Debit (Q), Kemiringan (I) dan waktu (T)*. Surakarta: Universitas Sebelas Maret.
- Muste, M. F. (2008). Large-scale Particle Image Velocimetry For Measurement in Riverine Enironments. *Water Resources Research*, W00D19.
- PIVlab. <https://pivlab.blogspot.com>. Diakses 14 juni 2019
- Prabowo, I. E. (2008). *Pola Aliran Permukaan Berbasis Pengolahan Citra Pada Model Fisik Hidraulik Dam Sei Tembesi*. Yogyakarta: Universitas Gadjah Mada.
- Pulung A. N., T. S. (2018). *Pengolahan Citra Digital*. Yogyakarta: ANDI.
- Putra, I. S. (2015). Studi Pengukuran Kecepatan Aliran Pada Sungai Pasang Surut. *Jurnal Teknik*, 33-46.
- Raharjo P. A., B. R. (2011). Pengembangan Particle Image velocimetry (PIV) Berbasis Pengolahan Citra untuk Pengukuran Aliran 2D. *Journal Annual Engginering*, 42-49.
- Raharjo, F. R. (2000). Pengembangan Metode Pengukuran Medan Kecepatan Aliran dengan Metode Bayangan Partikel. *Jurnal Teknik*, 132-146.
- Sakellariou, E. K. (2017). Application of Particle Image Velocimetry (PIV) and Digital Image Correlation (DIC) techniques on scaled slope models. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, Vol : 04.

- Sanusi, M. A. (2004). Komputasi Aliran Fluida Dinamik dengan Citra Digital dan PIV (Particle Image Velocimetry) Khususnya dalam Aplikasi Nuklir. *Jurnal Teknik Komputer*.
- Stamhius, W. T. (2014). PIVlab - Towards User- friendly, Affordable and Accurate Digital Particle Image Velocimetry in MATLAB. *Journal of Open Research Software*, 1-10.
- Suprayogi, I. M. (2012). Prediksi Ketersediaan Air Sebuah Daerah Aliran Sungai Menggunakan Pendekatan Model Rainrun. *Jurnal APTEK*, 89-96.
- Thickley, W. (t.thn.). *PIV lab*. Diambil kembali dari pivlab.blogspot.com.
- Transformasi https://amutiara.staff.gundarma.ac.id/..Bab-5_Konvolusi dan Transformasi Foruier.pdf.. Diakses 29 juli 2019.
- Triatmodjo, B. (1996). *Mekanika Fluida*. Yogyakarta: Beta Offset.
- Wasis, (2018). Implementasi Integral Fourier untuk Mendapatkan Sinyal Kecepatan dan Sinyal Simpangan dari Data Digital Sensor MEMS Accelerometer. *Jurnal Natural*, 153-159.